

공학석사 학위논문

쇄빙상선의 빙하중 고찰 및 빙해역 항행 모델

A Study on Ice Load Estimation for Icebreaking Cargo
Vessels and Ice Transit Model

지도교수 최 경 식

2008년 2월

한국해양대학교 대학원

해양개발공학과

정 성 엽

본 논문을 정성엽의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 : 공학박사 서 영 교 (인)

위 원 : 공학박사 김 채 수 (인)

위 원 : 공학박사 최 경 식 (인)

2008년 2월

한국해양대학교 대학원

해양개발공학과

정 성 엽

A Study on Ice Load Estimation for Icebreaking Cargo Vessels and Ice Transit Model

by

SEONG-YEOB JEONG

Department of Ocean Development Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

ABSTRACT

As the oil price soars and the Russian economy revives, increasing new orders of icebreaking cargo vessels become an important issue in the world's shipbuilding market. One of the areas of the concern which arises during navigation in ice-covered waters is the magnitude of ice impact loads encountered by ships. However, the accurate estimation of ice load still remains as a rather difficult task in the design of icebreaking vessels.

This study focuses on the development of a simple ice load prediction formula for the ice-going cargo vessels. For this purpose, various ice load scenarios are discussed concerning possible ship/ice interaction modes. Since the maximum ice loads are expected from unbroken ice sheet, these load are most likely to be concentrated at the bow area.

In this study, published ice load data for icebreaking vessels, from the model tests

and also from full-scale sea trials, are collected and then several ice load prediction formulas are compared with these data. Finally, based on collected data, a new, semi-empirical, ice load prediction formula is recommended for the design of icebreaking cargo vessels. An ice load estimation software "IceView" is developed by using ice load prediction formulas.

In addition, an ice transit model for icebreaking cargo vessels in the Northern Sea Route is studied. The ice transit model can select optimum sea routes with the shortest navigation time and the lowest operation cost. This model, with basic information such as ship capabilities, transit directions and months of transit, can calculate total transit distance and elapsed time, mean speed, operation cost for each vessel. In the ice transit model, environment information such as the site-specific ice conditions, wave and wind states is utilized for four different months (April, June, August, and October) along the Northern Sea Route. The model also defines the necessary periods of an icebreaker escort. Then the optimum sea routes are selected and visually displayed on the digital map using a commercial software ArcGIS. Usefulness of the selected sea routes is discussed.

목 차

ABSTRACT	i
목 차	iii
그 림 목 차	v
표 목 차	xi
I. 서 론	1
II. 빙하중 시나리오	4
2.1 빙하중과 빙저항	4
2.2 전체 빙하중과 국부 빙압력	6
2.3 빙하중 시나리오	9
III. 빙하중 실측자료 분석 및 추정식 고찰	11
3.1 빙하중 실측자료 분석	11
3.1.1 전체 빙하중 실측자료	11
3.1.2 국부 빙압력 실측자료	45
3.1.3 빙하중 실측자료 분석	67
3.2 빙하중 추정 경험식	78
3.2.1 전체 빙하중 추정식	78
3.2.2 국부 빙압력 추정식	90
3.2.3 추정식을 이용한 실선 빙하중 계산 사례	100
IV. 빙하중 산정 소프트웨어 "IceView"	105
4.1 개요	105
4.2 IceView를 이용한 빙하중 산정	109
4.2.1 전체 빙하중 산정식	109
4.2.2 국부 빙압력 산정식	115
4.2.3 IceView를 이용한 빙하중 산정 예	120
V. 빙해역 항행 모델	122

5.1 북극해 항로 항행 모델링	122
5.2 Ice Transit Model	123
5.2.1 빙해역 항행 시뮬레이션	127
5.2.2 ArcGIS를 이용한 최적 운항항로 구현	138
VI. 결 론	143
참 고 문 헌	146

그 립 목 차

Fig. 2-1 Ice loads on ship hull from collision with massive ice features	5
Fig. 2-2 Ice resistance and sequential icebreaking processes (Kotras et al., 1983).....	5
Fig. 2-3 Indentation pressure-contact area data (Sanderson, 1988).....	7
Fig. 2-4 Description of typical ramming scenario due to head-on impact (Keinonen, 1983).....	8
Fig. 2-5 Characteristics of global ice load history on ship's bow	8
Fig. 3-1 Modification of icebreaking tanker, Manhattan (野澤和男, 2006).....	12
Fig. 3-2 Pictures of Manhattan's voyage along the Northwest Passage.....	13
Fig. 3-3 Comparison of ice resistance measured from Manhattan's voyage and ice resistance calculated by Enkvist's method (野澤和男, 2006).....	13
Fig. 3-4 Canmar Kigoriak.....	14
Fig. 3-5 Beam modeling and forcing functions (Ghoneim et al., 1984).....	15
Fig. 3-6 Comparison between measured and predicted bending moment at frame (Ghoneim et al., 1984).....	15
Fig. 3-7 Global ice loads vs. ramming speed for Canmar Kigoriak (Ghoneim et al., 1984).....	16
Fig. 3-8 MV Arctic.....	17
Fig. 3-9 Strain gauge placement on the MV Arctic model (Daley et al., 1986).....	19
Fig. 3-10 Estimated peak vertical force vs. ship speed for MV ARCTIC derived from model test (Daley et al., 1986).....	19
Fig. 3-11 Maximum total vertical forces vs. ramming speed for the MV Arctic (German and Milne/VTT, 1985; Masterson and Frederking, 1993).....	20
Fig. 3-12 USCGC Polar Sea.....	20
Fig. 3-13 Strain gauge locations for instrumented bow panel aboard Polar Sea (SNAME SSC Report No.340, 1990).....	22
Fig. 3-14 Measured total ice force vs. ship speed from 1983 North Chukchi data (SNAME SSC Report No.340, 1990).....	23
Fig. 3-15 Measured total panel peak force vs. ship speed from 1984 Polar Sea trials (SNAME SSC Report No.339, 1990).....	23

Fig. 3-16 Measured total ice force vs. ship speed from 1984 Polar Sea Antarctic data (SNAME SSC Report No.340, 1990).....	24
Fig. 3-17 Peak force vs. ship speed for first-year events (SNAME SSC Report No.329, 1990).....	25
Fig. 3-18 Peak force vs. ship speed for multi-year events (SNAME SSC Report No.329, 1990).....	25
Fig. 3-19 Global ice loads vs. ramming speed for Polar Sea and Polar Star (SNAME SSC Report No.343, 1990).....	26
Fig. 3-20 General arrangement of icebreaker Oden (Lindberg et al., 1989).....	29
Fig. 3-21 Waterline of icebreaker Oden (Lindberg et al., 1989).....	30
Fig. 3-22 Locations of global load strain gauges at frame 107.5 of Oden (Liljestrom et al., 1990).....	30
Fig. 3-23 A sample of measured impact load during 1989 Oct. ramming test onboard icebreaker Oden (Liljestrom et al., 1990).....	31
Fig. 3-24 Total vertical bow force on Oden for impacts at three speeds on 4m thick ice (Frederking, 1999).....	31
Fig. 3-25 Two samples of measured impact loads during 1991 Oct. Polar voyage (Frederking, 2005).....	32
Fig. 3-26 Locations of strain measurement panels onboard Louis S. St. Laurent, 1984 Polar crossing voyage (Ritch et al., 1999).....	34
Fig. 3-27 Layout of strain gauges in the bow area (Ritch et al., 1999).....	34
Fig. 3-28 Maximum pressure on a single small panel vs. the total force (Ritch et al., 1999).....	35
Fig. 3-29 Total impact loads on Louis S. St. Laurent: (a) 1-2m thick ice (b) 4-5m thick ice (Frederking, 1999).....	36
Fig. 3-30 Location of MOTAN system on St. Laurent (Johnston et al., 2003).....	37
Fig. 3-31 Three highest global ice loads measured from MOTAN system during Louis S. St. Laurent trials (Johnston et al., 2003).....	37
Fig. 3-32 Global ice loads measured from MOTAN system during Louis S. St. Laurent trials, according to ice type (Johnston et al., 2003).....	38
Fig. 3-33 Global ice loads on the Louis S. St. Laurent, according to ice type (Johnston et al., 2003).....	38

Fig. 3-34 Location of MOTAN system on Healy (Johnston et al., 2003).....	40
Fig. 3-35 Components used to calculate global ice force (Johnston et al. 2003).....	40
Fig. 3-36 Schematic of MOTAN system (Johnston et al., 2001).....	41
Fig. 3-37 Ridge impact force estimated from MOTAN onboard the Healy (Johnston et al., 2001).....	42
Fig. 3-38 Global ice loads and motions of the Healy during part of Event H14 (Johnston et al., 2003).....	43
Fig. 3-39 Global ice loads on the Healy and the Louis S. St. Laurent, according to ice type (Johnston et al., 2003).....	44
Fig. 3-40 Global ice loads measured on the Healy and the Louis S. St. Laurent (Johnston et al., 2003).....	44
Fig. 3-41 The strength of ships of ice class 1A in the bow region.....	46
Fig. 3-42 Design ice pressure curves for the framing of ice class 1A proposed by Johansson(1967).....	46
Fig. 3-43 Local ice pressure vs. contact area for Canmar Kigoriak in linear scale (Daley, 1994).....	48
Fig. 3-44 Comparison of predicted and measured ice pressures as a function of contact area (Ghoneim and Keinonen, 1983).....	49
Fig. 3-45 Local ice pressure vs. contact area for Finnish icebreaker Sisu and some example design curves (SNAME SSC Report No.340, 1990).....	50
Fig. 3-46 Highest average pressure on a single sub-panel vs. impact speed for the 1982 summer Beaufort Sea data (SNAME SSC Report No.329, 1990).....	51
Fig. 3-47 Highest average pressure on a one sub-panel vs. Ship speed for the 1984 summer Beaufort Sea data (SNAME SSC Report No.339, 1990).....	51
Fig. 3-48 Summary of all data showing the number of events and the type of data in each geographical area (SNAME SSC Report No.329, 1990)	52
Fig. 3-49 Measured ice pressure vs. contact area from 1983 winter Polar Sea data (Daley, 1994).....	53
Fig. 3-50 Comparison of the extreme envelopes of various measured data during 1983 winter Polar Sea trials (SNAME SSC Report No.329, 1990).....	54
Fig. 3-51 Comparison of ice class regulations design pressures with 1983 winter Polar Sea measured data (SNAME SSC Report No.329, 1990).....	55

Fig. 3-52 Highest average pressure from 1982 and 1984 Beaufort Sea data vs. impact area (SNAME SSC Report No.339, 1990).....	56
Fig. 3-53 Average pressure vs. total contact area for 1984 Antarctic summer data (SNAME SSC Report No.340, 1990).....	56
Fig. 3-54 Location of strain gauges in the forebody of Igarka and Kapitan Danilkin (Tsoy et al. 1998).....	58
Fig. 3-55 Local ice pressure vs. contact area at a speed of 3-4m/s for SA-15 class ships (Tsoy et al. 1998).....	59
Fig. 3-56 Influence of ship's speed upon ice pressure and contact area (Tsoy et al. 1998).....	59
Fig. 3-57 Local ice pressure vs. contact area for 1984 MV Arctic trial (Masterson and Frederking, 1993).....	60
Fig. 3-58 Local ice pressure vs. contact area for 1984 MV Arctic trials (Daley, 1994).....	61
Fig. 3-59 Locations for the measurement of local ice impact loads (SNAME SSC Report No.376, 1995).....	62
Fig. 3-60 Extreme pressure for all hull panels vs. contact area (SNAME SSC Report No.376, 1995).....	63
Fig. 3-61 Single sub-panel pressure vs. ship speed (SNAME SSC Report No.376, 1995).....	64
Fig. 3-62 Hull panel ice load vs. ship speed (SNAME SSC Report No.376, 1995).....	64
Fig. 3-63 Hull panel local load vs. average observed ice thickness (SNAME SSC Report No.376, 1995).....	65
Fig. 3-64 Comparison of extreme pressure vs. contact area for Polar Sea and Nathaniel B. Palmer (SNAME SSC Report No.376, 1995).....	66
Fig. 3-65 Global ice loads vs. ship speed for Canmar Kigoriak.....	68
Fig. 3-66 Global ice loads vs. ship speed for Polar class icebreakers.....	68
Fig. 3-67 Global ice loads vs. ship speed for MV Arctic.....	69
Fig. 3-68 Global ice loads vs. ship speed for Swedish icebreaker Oden.....	69
Fig. 3-69 Global ice loads vs. ship speed for icebreaker Louis S. St. Laurent.....	70
Fig. 3-70 Global ice loads vs. ship speed for icebreaker Healy.....	70
Fig. 3-71 Global ice loads vs. ship speed for all icebreaking vessels.....	71

Fig. 3-72 Local ice pressure vs. contact area for US oil tanker Manhattan.....	72
Fig. 3-73 Local ice pressure vs. contact area for Finnish icebreaker Sisu.....	73
Fig. 3-74 Local ice pressure vs. contact area for Canmar Kigoriak.....	73
Fig. 3-75 Local ice pressure vs. contact area for Polar class icebreakers.....	74
Fig. 3-76 Local ice pressure vs. contact area for 1984 MV Arctic.....	74
Fig. 3-77 Local ice pressure vs. contact area for SA-15 class ships.....	75
Fig. 3-78 Local ice pressure vs. contact area for Nathaniel B. Palmer.....	75
Fig. 3-79 Local ice pressure vs. contact area for all icebreaking vessels.....	76
Fig. 3-80 Extreme ice forces on Canmar Kigoriak vs. ship's speed (Ghoneim et al., 1984).....	80
Fig. 3-81 Extreme ice forces on Polar 8 class icebreaker vs. ship's speed. (Glen et al., 1985).....	82
Fig. 3-82 Non-dimensional maximum ice force and normal velocity times flexural strength for the Polar Sea, 1983 measured data (SNAME SSC Report No.329, 1990).....	86
Fig. 3-83 Global ice loads vs. ship speed for six icebreaking vessels.....	88
Fig. 3-84 Global ice loads vs. ship speed data and several global ice load prediction equations.....	88
Fig. 3-85 Global ice loads vs. ship speed data and the proposed global ice load prediction equation.....	89
Fig. 3-86 Local ice pressure vs. contact area (Masterson and Frederking, 1993)....	92
Fig. 3-87 Indentation pressure vs. contact area for various test data (Sanderson, 1988).....	93
Fig. 3-88 Upper bound curve of the form $P = c A^{-1/2}$ for various indentation pressure data (Sanderson, 1988).....	93
Fig. 3-89 Ashby et al.(1986) design curve for local ice indentation pressure data (Sanderson, 1988).....	94
Fig. 3-90 Average Pressure as a function of hull design area for St. Laurent (Frederking, 2003).....	95
Fig. 3-91 Average pressure vs. design area for Terry Fox bergy bit impact data (Frederking et al., 2005).....	95
Fig. 3-92 Probability of average ice pressure vs. design area for Oden (Frederking,	

2005).....	96
Fig. 3-93 Local ice pressure vs. contact area for seven icebreaking vessels.....	97
Fig. 3-94 Local ice pressure vs. contact area data and several local ice pressure prediction equations.....	98
Fig. 3-95 Local ice pressure vs. contact area data and the proposed global ice load prediction equation.....	98
Fig. 3-96 Local ice pressure vs. contact area data in linear scale and the proposed global ice load prediction equations.....	99
Fig. 4-1 Flowchart of the IceView ver 1.2.....	105
Fig. 4-2 Input parameters of ship and ice to ice load estimation.....	106
Fig. 4-3 Calculation of global ice loads for selected ice load prediction formulas..	107
Fig. 4-4 Table of the calculated global ice loads.....	107
Fig. 4-5 Graph of the calculated global ice loads vs. sea trial data in liner scale	108
Fig. 4-6 Graph of the calculated local ice pressures vs. sea trial data in log scale.....	108
Fig. 5-1 Northern Sea Route (NSR).....	122
Fig. 5-2 Various sea route of the Northern Sea Route.....	123
Fig. 5-3 Data and decision nodes selected for the Northern Sea Route. Redrawn from Mulherin et al.(1996).....	124
Fig. 5-4 Russian Norilsk-class SA-15 multipurpose icebreaking cargo ship (Mulherin et al. 1996).....	129
Fig. 5-5 Finnish Lunni-class liquid bulk carrier (Mulherin et al. 1996).....	130
Fig. 5-6 Russian Strekalovsky-class dry bulk carrier (Mulherin et al. 1996).....	130
Fig. 5-7 Russian Vasily Dinkov arctic commercial tanker.....	131
Fig. 5-8 Flowchart of ice transit model simulation procedures.....	134
Fig. 5-9 Monthly optimum sea routes determined.....	136
Fig. 5-10 Flowchart of ArcGIS process.....	139
Fig. 5-11 Visualization of monthly optimum sea routes selected.....	141

표 목 차

Table 2-1 Ice conditions and various ice-ship interaction modes·····	10
Table 2-2 Various ice and ship parameters needed to determine ice failure modes and ice loads·····	10
Table 3-1 Dimension of the SS Manhattan·····	12
Table 3-2 Dimension of the Canmar Kigoriak·····	14
Table 3-3 Global ice loads vs. ramming speed for Canmar Kigoriak·····	17
Table 3-4 Dimension of the MV Arctic·····	18
Table 3-5 Dimension of the Polar Sea·····	21
Table 3-6 Global ice loads vs. ramming speed for Polar class icebreakers·····	27
Table 3-7 Dimension of the Oden·····	28
Table 3-8 Global ice loads vs. ship speed for icebreaker Oden·····	32
Table 3-9 Dimension of the Louis S. St. Laurent·····	33
Table 3-10 Dimension of the USCG Healy·····	39
Table 3-11 Comparison between August and October test conditions·····	47
Table 3-12 Dimension of the Sisu·····	50
Table 3-13 Dimension of the SA-15 class·····	57
Table 3-14 Ice pressure vs. contact area for SA-15 class cargo vessels·····	58
Table 3-15 Dimension of the Nathaniel B. Palmer·····	61
Table 3-16 List of icebreaking vessels for sea trial data measurement·····	77
Table 3-17 Dimension of the Polar 8 icebreaker·····	83
Table 3-18 Dimension of the PC 2 LNG vessel·····	84
Table 3-19 Parameters of icebreaking vessels and icebreaking cargo vessels for ice load estimation·····	100
Table 3-20 Calculated global ice loads and local ice pressures of icebreaking vessels and icebreaking cargo vessels for ice load prediction formulas·····	102
Table 3-21 Summary of global ice load prediction equations·····	103
Table 3-22 Summary of local ice pressure prediction equations·····	104
Table 4-1 Dimension of the icebreaking research vessel·····	120
Table 4-2 Calculation of the global ice loads[MN] for ship speeds·····	121
Table 4-3 Calculation of the local ice pressures[MPa] for contact areas·····	121

Table 5-1 Node data of the Northern Sea Route..... 125

Table 5-2 Determination of ship’s speed in knots based on sea ice thickness and
concentration..... 132

Table 5-3 Initial ship speed to compensate for selected sea route..... 132

Table 5-4 Determination of ship’s speed in knots based on wind direction, ice
concentration and wave height..... 133

Table 5-5 Results of transit model simulation..... 137

I. 서론

최근 국제 원유가의 급격한 상승으로 과거 경제성이 떨어져 외면해 왔던 극지 자원 개발의 필요성이 대두되고 있으며, 이와 함께 고유가로 인한 러시아 경제력 확대는 북극해 연안 시베리아의 개발과 북극해 항로(Northern Sea Route, NSR) 이용에 적극적인 노력을 기울이게 하였다.

빙해역을 운항하는 선박의 기존 방법은 유도쇄빙선에 의한 항로 개설이다. 하지만 유도되는 선박의 크기가 유도쇄빙선의 크기를 초과할 수 없기 때문에 만약 북극해 항로를 운항하는 선박의 규모가 더 증가한다면 Arktika Class와 같은 대형 원자력 쇄빙선도 유도쇄빙선의 역할을 수행하기 어려워 질 것이다. 따라서 빙해 운항용 대형 선박의 부족 현상은 북극해 항로를 독자적으로 항행 할 수 있는 쇄빙상선의 건조가 곧 필요하리라는 점을 시사한다.

현재 러시아 쇄빙선단의 노후화로 인해 중·장기적으로 이를 대체하기 위한 새로운 쇄빙상선에 대한 수요가 창출될 것으로 예측된다. 최근 국내 조선사의 추정에 따르면 국제 원유/천연가스의 가격 상승으로 오는 2012년까지 쇄빙유조선 40척 가량이 발주될 것으로 보고 있는데, 이는 50억불 이상의 새로운 조선시장이 창출되는 것이다. 또한 극지 운항용 선박 시장의 규모는 쇄빙유조선 외에 쇄빙LNG선, 쇄빙컨테이너선 등으로 확대될 것으로 전망하고 있으며, 이러한 흐름은 고부가가치 전략을 기조로 하고 있는 현재 국내 조선 산업에 호기가 될 것으로 판단된다. 지금까지 국내 조선사가 수주 받은 선박의 약 25% 정도는 빙해역을 운항할 수 있는 Ice class 선박이며, 이 비율은 계속 증가하고 있는 추세이다 (한국산업기술평가원 2006).

쇄빙선박 설계 시 가장 중요한 사항은 빙하중 산정 문제이다. 이는 국외 및 국내 조선사들의 공통된 주요 관심사로서, 정확한 빙하중의 크기가 산정된다면 선체 구조 및 선형, 출력기관 등의 결정을 통해 최적선형 설계가 가능해진다. 하지만 선박에 작용하는 빙하중을 산정하기 위해서는 빙하중의 개념과 함께 빙-선체 상호작용에 대한 이해가 필수적인데, 이 과정은 매우 복잡하여 아직까지도 명확한 해법은 잘 알려져 있지 않는 실정이다.

한편 국내 조선 현장에서 수주한 쇄빙선박의 건조 시 러시아와 핀란드, 캐나다 등의 선급 규정을 준수하고 있는데, 이러한 선급 규정들 역시 기 축적된 실측자료의 분석을 통해 얻어진 경험치를 바탕으로 설계조건을 제시하고 있으므로, 일부는 명확한 근거가 없이 과도한 설계조건이 반영되어 있는 것으로 판단된다. 그러므로 향후 독자적인 쇄빙선박의 건조기술을 확보하기 위해 국내에서도 빙하중 산정에 대한 연구가 중점적으로 이루어져야 한다.

이와 함께 건조된 쇄빙선박을 이용한 빙해역 운항에 있어 여러 기술적 어려움 중 하나는 북극해 지역의 빙상환경과 선박의 통항 항로에 대한 분석이다. 국외의 러시아, 노르웨이, 일본 등에서는 INSROP(International Northern Sea Route Program, 1993-99년)을 통해 북극해 항로의 연중 빙상조건에 대한 정보의 구축과 함께 항로분석을 수행하여 상당한 기술력을 확보하고 있다. 하지만 아직 국내에서는 쇄빙선박의 건조에 보다 많은 관심을 기울였기 때문에 빙해역 운항 항로에 대한 연구는 거의 다루어 지지 않았다. 그러나 쇄빙선박을 이용해 북극해 항로를 운항할 경우 다양한 빙상조건에 따라 필연적으로 선택될 수밖에 없는 다양한 항로의 가능성이 존재하기 때문에 이에 대한 연구도 빙하중 산정 문제와 함께 병행되어야 한다.

이러한 배경으로 본 논문에서는 빙해역 항행 시 쇄빙선박에 작용하는 빙하중 산정 문제와 빙해역 항행 모델을 다루었다.

우선 빙하중의 개념을 이해하고 빙-선체 상호작용을 파악하여 빙하중 시나리오를 정리하였다. 그 다음 기 발표된 빙하중 추정식 고찰과 함께 실선 계측자료를 정리하여 빙하중 산정 경험식의 도출 배경을 파악하였다. 이를 통해 쇄빙선박에 적용 가능한 간편하고 실용적인 빙하중 추정식을 제안하였다.

이를 바탕으로 실제 조선 현장에서 쇄빙선박의 선체 구조설계 시 빙하중을 좀 더 쉽고 편리하게 산정할 수 있도록 GUI 소프트웨어를 개발하였다. 이번에 개발한 빙하중 산정 소프트웨어 "IceView"는 기 발표된 선체 빙하중 추정 경험식(9개)과 국부 빙압력 추정 경험식(8개) 그리고 새롭게 제안한 빙하중 추정식(식 3-16, 3-28, 3-29)을 통해 대상선박의 제원과 얼음에 대한 각각의 물성치를 입력하여 쇄빙선박에 작용하는 빙하중을 계산한다. 또한 "IceView"는 기 정리된 빙하중 실측자료를 모두 포함하고 있어 사용자가 계산한 빙하중 추정값을 통해 실측자료와의 비교/분석이 가능하도록 하였다.

또한 본 연구에서는 빙해역의 빙상환경 정보(얼음의 두께, 집적도, 풍향, 파고 등)를 바탕으로 무르만스크(Murmansk)에서 베링해협(Bering Strait)을 통과하는 북극해 항로 운항 시 쇄빙선박의 예상되는 최적 운항항로를 빙상정보로부터 선정하고 이와 함께 선정된 운항항로 이용 시 선박의 총 항행거리 및 소요시간, 평균속도, 유도쇄빙선의 사용 시간, 항행비용을 계산하는 빙해역 항행 모델(ice transit model)을 개발하였다. 이는 실제현장에서 쇄빙선박을 이용한 운항 시 예상되는 상황을 미리 검증할 수 있다.

이러한 과정을 통해 쇄빙선박의 구조설계 시 선박이 받게 될 빙하중 산정과 함께 빙해역 항행 시 최적 운항항로의 선정을 통해 쇄빙선박의 안전성과 경제성 모두를 충족시킬 수 있는 하나의 방안으로서 본 연구에서 수행하였다.

II. 빙하중 시나리오

2.1 빙하중과 빙저항

빙하중이란 빙해역을 운항하는 선박 혹은 극지해양구조물 등이 얼음과의 충돌에 의해 발생하는 힘을 일컫는다. 쇄빙선박의 경우 일반선박과는 달리 빙해역 통과 시 받게 되는 빙하중이 파랑하중이나 조파저항과 같은 유체저항이나 슬래밍(slamming)보다 훨씬 크게 작용하기 때문에 쇄빙선박의 구조설계 시 빙하중 문제를 보다 중점적으로 다룬다.

빙저항은 빙하중과는 달리 빙해역 항행 시 얼음에 의해 선박의 진행방향에 반대방향으로 작용하는 힘으로서, 선박 추진기관의 출력과 관계된 문제로 선체를 강체(rigid body)로 취급하여 선체의 구조적 변형은 생각하지 않는다. 특히 쇄빙과정에서 빙저항은 일정한 전진방향의 속도를 유지하기 위한 추진력의 요구조건(power requirement)에 해당하는 것이므로, 이는 선박에 작용하는 최대 빙하중이 아닌 평균 하중에 해당한다. 반면 빙하중은 선체 구조에 영향을 미치는 요소로서, 이는 선박의 종강도(longitudinal strength)상의 문제나 진동문제를 일으키는 전체 빙하중(global ice load)과 선박의 선수나 선측외판에 직접 작용해서 부재의 구조적 변형을 유발시키는 국부 빙압력(local ice pressure) 문제로 취급한다. 그러므로 빙하중은 쇄빙능력과는 관계없이 빙산(iceberg), 빙맥(ice ridge), 두꺼운 평탄빙(thick level ice) 등과 같은 다양한 얼음과 충돌 시 선체에 작용하는 힘을 의미하며, 얼음이 깨지지 않을 경우 극한 빙하중(extreme ice load)이 발생한다.

다시 말하면 빙하중을 선박의 구조적 변형을 유발시키는 힘의 관점으로 본다면 빙저항은 빙해역을 운항할 수 있는 쇄빙능력 즉, 선박의 추력(thrust) 개념으로 이해하는 것이 보다 정확하다.

최근 몇 년 동안 캐나다와 핀란드, 러시아와 같은 쇄빙선박의 건조 경험이 많은 나라에서도 빙해역을 운항하는 쇄빙선박의 설계 빙하중(design ice load) 문제가 중점적으로 논의되고 있다. 이는 쇄빙선박에 작용하는 빙하중을 추정하는 작업이 그 만큼 어렵고 정교한 작업임을 시사한다. 특히 설계 빙하중 산정 시 어떠한 변수를 고려할지 결정해야하고 선박과 얼음과의 상호작용에 관한 이해가 필수적인데, 이들 과정 모두 매우

복잡하여 아직까지도 빙하중 산정에 대한 명확한 해결 방법을 제시할 수 없는 것이 현실이다.

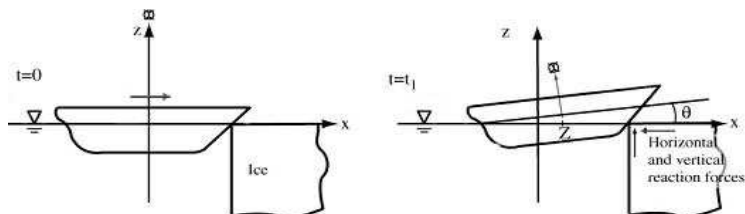


Fig. 2-1 Ice loads on ship hull from collision with massive ice features

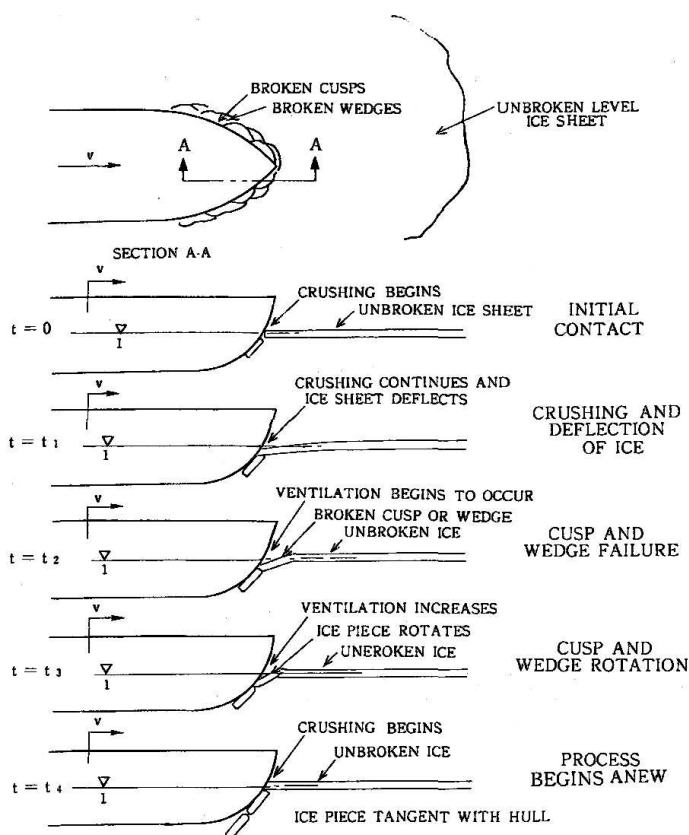


Fig. 2-2 Ice resistance and sequential icebreaking processes (Kotras et al., 1983)

2.2 전체 빙하중과 국부 빙압력

빙해역 운항 시 쇄빙선박에 작용하는 빙하중은 얼음과 충돌 시 발생하는 선체의 응답형태와 접촉면적의 크기에 따라 전체 빙하중과 국부 빙압력 문제로 구분하여 접근해야 한다. 다시 말하면 전체 빙하중은 선체를 하나의 구조부재로 간주하여 거동 특성은 얼음과의 상호작용에 의해 선박의 종강도상의 문제나 선체 운동 및 진동의 관점에서 다루어야 하는 문제이다. 반면 국부 빙압력은 빙해역 항행 시 선체 외판 및 그 주변 부재에 직접 작용하여 구조적 손상을 유발시키므로 부재의 탄·소성 변형의 관점에서 취급해야 한다.

일반적으로 실험실에서 측정하는 작은 규모의 얼음은 압력이 10~20MPa에서 파괴되지만, 빙해역 현장에서 수행된 실선 규모의 실험에서는 얼음이 1~3MPa 정도의 압력에서 파괴되는 것을 볼 수 있다. Sanderson(1998)은 쇄빙선 혹은 극지해양구조물의 현장계측 빙압력 자료와 함께 실험실에서 수행된 관입시험(indentation test) 자료를 정리하였다 (Fig. 2-3). 이는 압력-면적 곡선(pressure-area curve)으로서 얼음과의 접촉면적과 빙압력의 상관관계를 이해할 수 있다. 즉, 얼음과의 접촉면적이 증가하면 빙압력은 감소한다는 것이다. 이것은 작은 면적에서 측정된 각각의 최대 빙압력과 다른 곳에서 측정된 압력의 최대값이 동시에 발생하지 않기 때문이고, 이를 통해 접촉면적과 빙압력의 연관성을 확인 할 수 있다.

Fig. 2-4와 Fig. 2-5에는 충격쇄빙 시 발생하는 선체의 거동특성과 전체 빙하중의 변화 양상에 대해 나타내었으며, 이를 정리하면 다음과 같다.

우선 선수부가 얼음과 부딪히면 충격에 의해 빙하중이 급격히 발생하며, 이는 선수부가 얼음 위로 미끄러져 올라가는 순간까지 지속된다. 이 단계에서는 선수부에 극한 빙하중(extreme ice load)이 발생하며, 지속시간이 0.5초에서 1초 이내의 짧은 시간에 발생하는 동적(dynamic) 프로세스다 (Fig. 2-5). 그리고 이때 선박의 전진속도는 V_0 에서 V_1 으로 감소하며, 이때 얼음의 파괴모드는 crushing에 의한 것이다.

선수부가 얼음 위로 미끄러져 올라가는 동안 선박의 선수부에 수직한 방향의 속도성분은 감소하고 선체에 수직한 방향의 속도성분은 증가하여 최고치에 도달하게 된다. 그리고 이때 얼음과의 접촉면적도 최대에 이른다.

이러한 과정에서 선수부는 ice knife에 의해 결국 정지 상태에 이르게 되는데, 이 단계에서 선박에 수직한 방향의 속도성분과 선수부에 수직한 방향의 속도 성분이 모두 감소하며, 또 다른 peak 빙하충이 발생한다. 이는 초기 충격단계에서 발생한 하중의 크기와 비슷하지만, 지속시간은 2~3초 이상으로서 정적(static) 프로세스로 취급할 수 있다 (Fig. 2-5). 그리고 이때 얼음의 파괴모드는 주로 bending에 의한 것이다.

이렇게 빙-선체 상호작용에서 두개의 peak force가 발생하는데, 하나는 선박과 얼음의 충돌 시에 발생하는 동적하중이고 또 다른 하나는 선수부가 얼음 위로 올라간 후 발생하는 정적하중으로 구분할 수 있다.

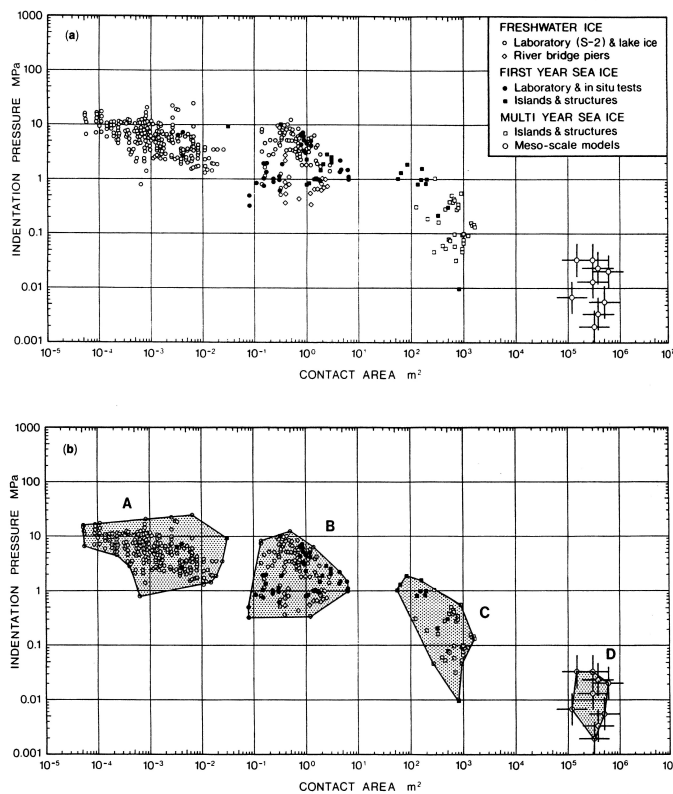


Fig. 2-3 Indentation pressure-contact area data (Sanderson, 1988)

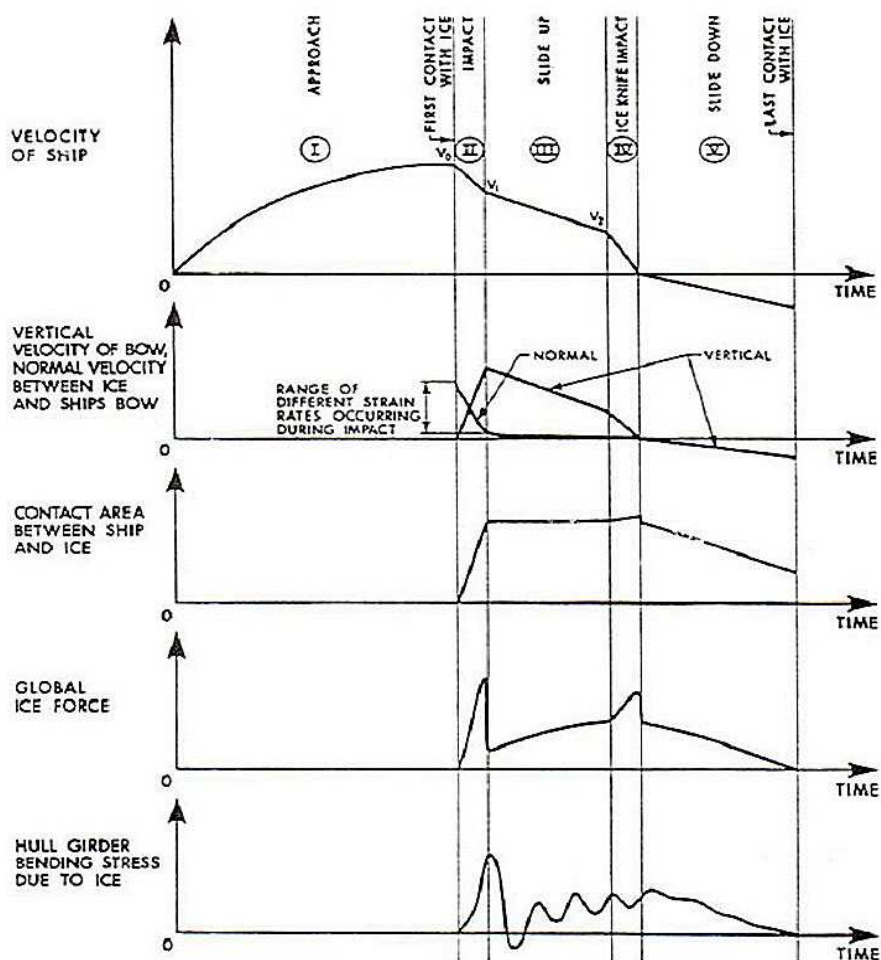


Fig. 2-4 Description of typical ramming scenario due to head-on impact (Keinonen, 1983)

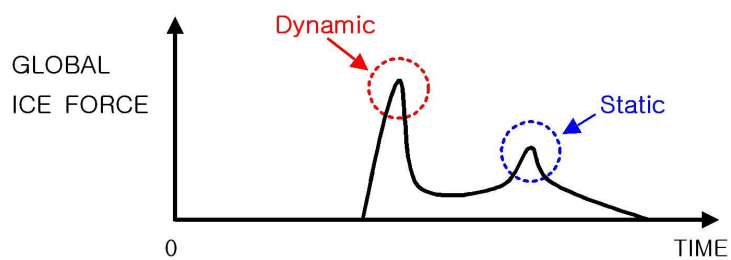


Fig. 2-5 Characteristics of global ice load history on ship's bow

2.3 빙하중 시나리오

최근 빙-선체 상호작용에 따른 빙하중 산정 문제는 조선현장에서 중요한 관심사가 되고 있다. 하지만 이는 얼음의 파괴모드 및 재료특성, 선박의 크기 및 선수 형상, 충돌 속도 등과 같은 다양한 변수가 존재하므로 상당히 어려운 문제이다.

우선 빙하중을 결정하는데 있어 중요한 사항 중 하나는 쇄빙선박의 빙해역 운항 방식으로서, 이는 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 평탄빙에서의 연속쇄빙 (continuous icebreaking)
- 두꺼운 빙맥에서의 충격쇄빙 (ramming or charging)
- 유도쇄빙선 후방의 넓혀진 수로 내에서의 운항 (motion in broken channel)
- 유빙군 내에서 운항 (motion in drifting ice field or open pack ice)

통상적으로 빙해역 운항 시 얇은 평탄빙에서는 연속쇄빙(continuous icebreaking)이 가장 일반적인 운항 방식이다. 이때 선박에 작용하는 빙하중은 그리 크지 않아 빙하중 문제보다는 선수부나 선체 외판의 피로-진동문제가 더 중요하다. 하지만 두꺼운 빙판 또는 빙맥과 만나는 경우에는 충격쇄빙(ramming)을 통해 운항하며, 이 경우 선박의 선수부에는 가장 큰 하중이 발생하게 된다. 이는 극한 빙하중으로서 흔히 얼음이 깨어지지 않을 때 발생하고 선박의 구조적 문제를 유발시킨다. 이와 함께 쇄빙과정에서 선박이 얼음 위로 올라가 좌초되는 경우에는 선체 중앙부에 빙하중(beaching)이 발생하며 쇄빙과정 중 깨어진 빙편이나 유빙군 내를 운항하다 선측 외판이 빙판 사이에 끼이는 경우에는 선측에 압축하중(jamming)이 작용하게 된다. 그러므로 빙하중 산정 문제에서는 통항 항로의 빙상상태에 따라 연속쇄빙 시에는 부재의 피로 및 진동 문제가 제일 중요하지만 빙상조건이 열악한 경우에는 ramming과 beaching, jamming이 우선적으로 고려되어야 한다.

Table 2-1에는 빙해역의 다양한 빙상상태와 조건에 따른 쇄빙선박의 운항 방식을 정리하였다. 그리고 Table 2-2에는 빙하중 산정을 위한 얼음과 선박의 변수 정리와 함께 얼음의 파괴모드를 분류하였다. 그러므로 빙하중 산정 문제는 Table 2-1과 Table 2-2를 통해 빙상조건에 따른 쇄빙선박의 다양한 빙하중 시나리오를 파악함으로써 보다 쉽게 접근할 수 있다.

Table 2-1 Ice conditions and various ice-ship interaction modes

<i>Ice Condition</i>	<i>Characteristics</i>	<i>Interaction Modes</i>
Level Ice (평탄빙 平坦氷) [includes land-fast ice]	10/10, FY	C, R, S, B
Ice Ridges (빙맥 氷脈)	single or multiple, FY or MY	R, S, B
Rubble Fields (얼음조각층)	grounded or floating	R, S
Iceberg (빙산 氷山)	single	R, S
Ice Floes (빙판 氷盤)	single or multiple, FY	C, R, S, B
Pack Ice (유빙 流氷) [ice ridges may exist]		
level 4 (very close pack ice)	9/10 - 10/10	C, R, S
level 3 (close pack ice)	7/10 - 8/10	C, R, S
level 2 (open pack ice)	4/10 - 6/10	C, S
level 1 (very open pack ice)	1/10 - 3/10	C, S
open water (ice free)	< 1/10	
Brash Ice [broken ice pieces in channel]	consolidated or loose	C, S
<i>Remarks</i>	<i>Ice Concentration</i> [0/10 - 10/10] <i>FY</i> : First-year Ice <i>MY</i> : Multi-year Ice	<i>C</i> : Continuous icebreaking <i>R</i> : Ramming <i>S</i> : Side hull compression <i>B</i> : Beaching on ice

Table 2-2 Various ice and ship parameters needed to determine ice failure modes and ice loads

<i>Ice Properties</i>	<i>Ship Properties</i>	<i>Ice Failure Modes</i>	<i>Load Estimation Models</i>
Ice Sheet Thickness Flexural Strength Crushing Strength Ice Density Young's Modulus Poisson's Ratio Friction Coefficient Temperature Grain Size/Orientation Salinity	Ship Speed Displacement Length Breadth Depth/Draft Hull Form/Lines Engine Power	Crushing Bending Buckling Spalling/Shear Failure Circumferential and Radial Cracking Creep	N/C

Ⅲ. 빙하중 실측자료 분석 및 추정식 고찰

3.1 빙하중 실측자료 분석

3.1.1 전체 빙하중 실측자료

선박에 작용하는 빙하중을 측정하는 가장 좋은 방법은 실선을 이용해 직접 측정하는 것이다. 하지만 실선 측정의 경우 경제적 비용이 많이 들며, 이렇게 측정된 빙하중의 경우 극한 빙상환경(severe ice condition)속에서 선박이 큰 손상을 받을 정도의 운항보다는 선박의 구조적 안전을 위해 보다 온화한 환경 속에서 측정된 값이기 때문에 극한 빙하중(extreme ice load)보다 다소 작은 값이 측정되는 경우가 많다. 또한 얼음의 두께 및 재료특성, 선박의 속도 등과 같은 정보를 매순간 측정하기 어렵기 때문에 빙해역 항행 시 선체의 광범위한 부분에 작용하는 빙하중의 분포를 정확히 파악하기는 매우 어렵다.

3장에서는 지금까지 수행된 실선 측정자료를 정리하였다. 그리고 정리된 자료를 바탕으로 빙하중의 경향에 대해 분석해 보았다.

(1) Icebreaking Tanker "Manhattan"

Manhattan호는 1962년 Bethlehem Steels' shipyard에서 건조한 유조선으로서 1968년 알래스카의 North Slope에서 대규모 유전이 발견됨에 따라 생산된 원유를 캐나다의 북극해를 경유하여 미국 동부해안 소비지까지 쇄빙상선을 이용하여 북서항로(Northwest Passage)를 통한 해상수송이 가능한지 검토하기 위해 1969년과 1970년에 걸쳐 시험운항을 수행하였다.

Manhattan호는 원래 일반 유조선이었지만, 선수 선형과 함께 선체 중앙부의 내빙대(ice belt)와 선미부의 구조적인 보강을 통해 쇄빙유조선(icebreaking tanker)으로 개조되었다. 모형시험은 캘리포니아의 Naval Undersea Warfare Center, 프랑스의 Sogreah, 핀란드의 Wartsila에서 수행되었으며, 개조된 Manhattan호 제원은 Table 3-1과 같다.

시험운항에서 Manhattan호는 엔진 출력 부족으로 두께 4ft(1.22m) 이상의 얼음에서는 3knots(1.54m/s) 속도로 연속쇄빙이 불가능하여 충격쇄빙(ramming) 방식으로 운항함으로서 선체와 프로펠러에 많은 손상을 입었지만 캐나다 북극해 항로의 해상운송이 겨울철에도 기술적으로 가능하다는 것을 입증하였다. Manhattan호의 시험항해는 쇄빙상선을 이용한 북극해에서의 최초 시험이라는 데 의의가 있다. 하지만 시험운항에서 기록된 빙하중 크기나 모형시험의 관련 자료는 거의 없다 (Mookhook et al., 1981).

Table 3-1 Dimension of the SS Manhattan

선박 제원	길이(Length Overall)	L_{oa} (m)	306.3
	폭(Moulded Breadth)	B (m)	50.5
	흘수(Draft)	d (m)	16.8
	배수량(Displacement)	Δ (tons)	115,000
선박 성능	기관출력(Engine Power)	(shp/MW)	43,000/3.6
선수 형상	선수각(Stem Angle)	γ (deg)	18

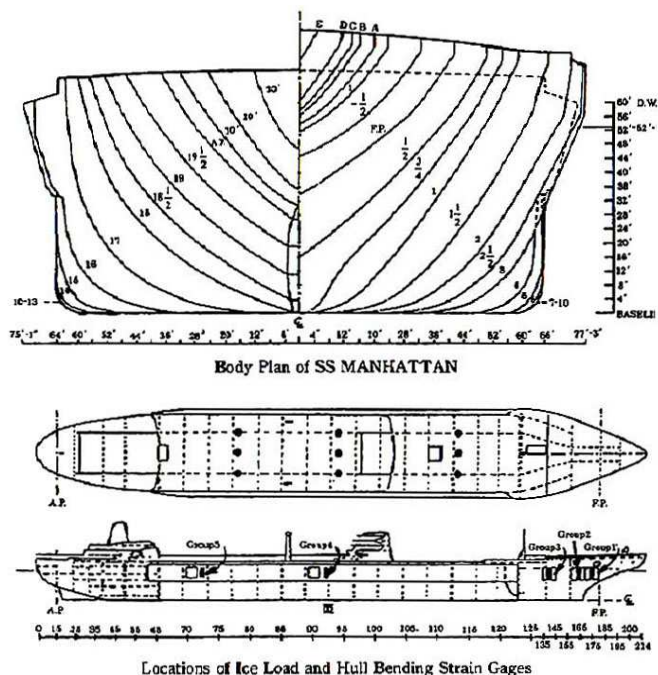


Fig. 3-1 Modification of icebreaking tanker, Manhattan (野澤和男, 2006)



Fig. 3-2 Pictures of Manhattan's voyage along the Northwest Passage

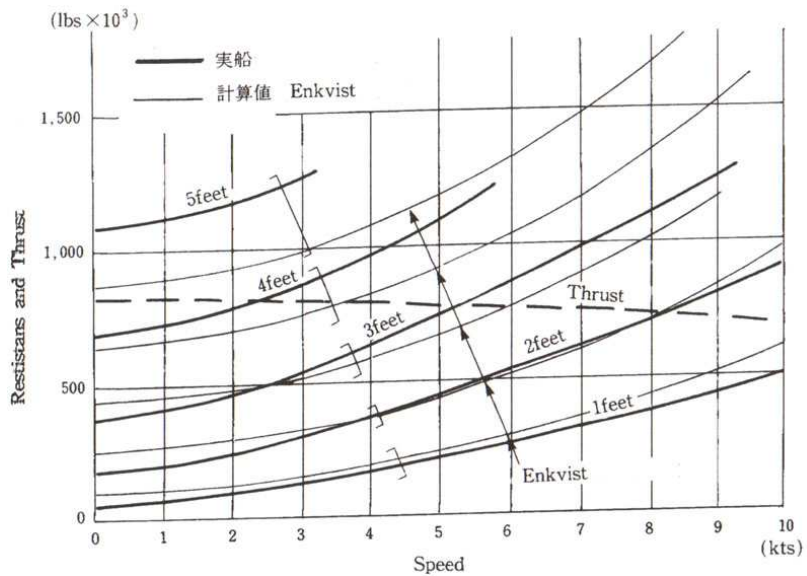


Fig. 3-3 Comparison of ice resistance measured from Manhattan's voyage and ice resistance calculated by Enkvist's method (野澤和男, 2006)

(2) Canadian Coast Guard Icebreaker "Canmar Kigoriak"

캐나다는 북극해에서 연중 단독항해가 가능한 선박의 건조를 위해 1981년과 1983년에 걸쳐 Canmar Kigoriak호와 Robert Lemeur호의 실선시험을 통해 쇄빙선박에 작용하는 빙하중을 추정하였다. 특히 1983년 6월, 7월, 10월 Beaufort 해에서 수행되었던 시험은 쇄빙선박이 1년생빙 또는 두꺼운 다년생빙과의 충돌 시 발생하는 전체 빙하중을

시간에 따라 측정하는 것이 주된 목적이었다. 시험운항에 사용된 Canmar Kigoriak호의 제원은 Table 3-2와 같다.

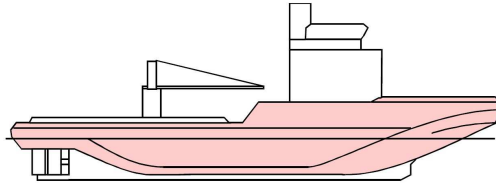


Fig. 3-4 Canmar Kigoriak

Table 3-2 Dimension of the Canmar Kigoriak

선박 제원	길이(Length)	L_{pp} (m)	79.3
	폭(Moulded Breadth)	B (m)	17.3
	깊이(Moulded Depth)	D (m)	10.0
	흘수(Draft)	d (m)	8.5
	배수량(Displacement)	Δ (tons)	8,549
선박 성능	기관출력(Engine Power)	(shp/MW)	17,400/12.2
선수 형상	선수각(Stem Angle)	γ (deg)	24
	선수선형(Bow Type)	spoon bow	
빙등급	Ice class	CASPPR class 3	

이전의 실선시험은 선수부와 같은 선체의 특정부위에 대해서만 계측하여 그 결과로부터 전체 빙하중을 추정하였다. 하지만 Canmar Kigoriak호에는 6자유도 보요소 유한요소 모델 SAP IV를 이용해 최대 하중이 발생하는 지점을 미리 결정하고 이를 바탕으로 계측장치의 부착위치를 선정하여 선체의 각 프레임에 strain gauge와 shear gauge 그리고 accelerometer, ice pressure gauge, Doppler microwave radar 등을 설치하였다. 그리고 이렇게 부착된 계측장치를 이용해 시간에 따라 선체에 작용하는 전단력과 굽힘모멘트를 측정하여 외삽법(extrapolate)을 통해 쇄빙선박의 선수부에 작용하는 전체 빙하중을 추정하였다. Fig. 3-5에서는 선박의 유한요소 모델과 하중함수의 형태를 Fig. 3-6에서는 유한요소 모델을 이용해 Kigoriak호의 각 프레임에서 측정된 굽힘모멘트의 예측값과 실선시험에서 얻어진 실측값을 비교하여 보여주고 있다.

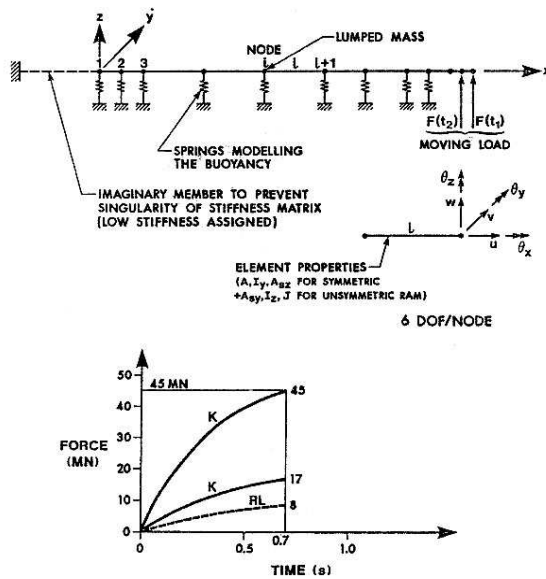


Fig. 3-5 Beam modeling and forcing functions (Ghoneim et al., 1984)

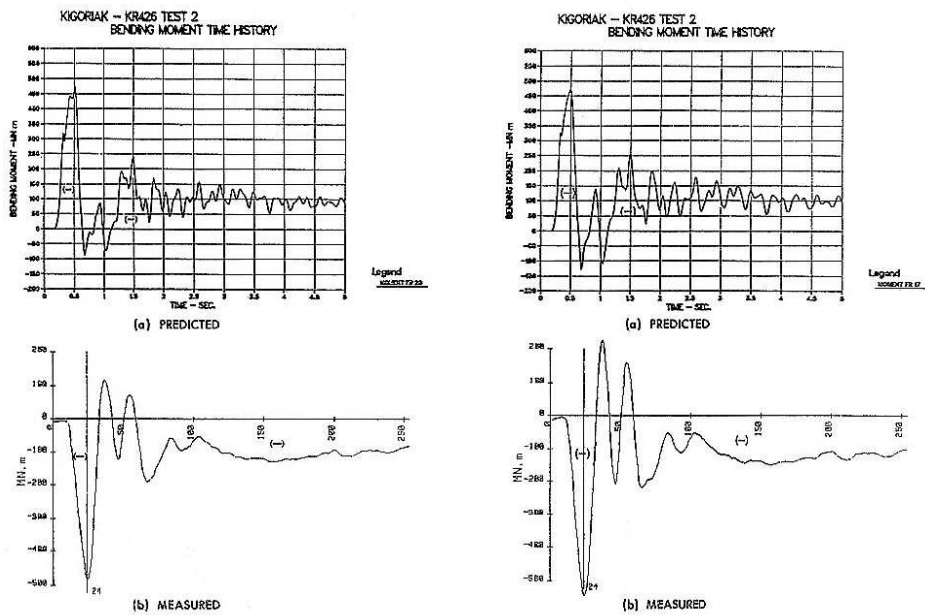


Fig. 3-6 Comparison between measured and predicted bending moment at frame (Ghoneim et al., 1984)

Canmar Kigoriak호는 6월과 7월, 1년생빙에서 1.5~6.3m/s 정도의 충돌속도로 실선 시험을 수행하였다. 10월 시험에서는 다년생빙에서 수행되었는데, 6월과 7월의 실측자료의 분석을 통해 선박의 앞 갑판부와 중앙부에 계측장치를 추가로 부착하였다. 1983년 시험에서는 대략 400여개의 충돌 이벤트가 기록되었으며, 이를 바탕으로 Fig. 3-7에 추정된 전체 빙하중의 크기를 선박의 충돌속도의 함수로 표현하여 나타내었고 Table 3-3에 그 결과를 정리하였다.

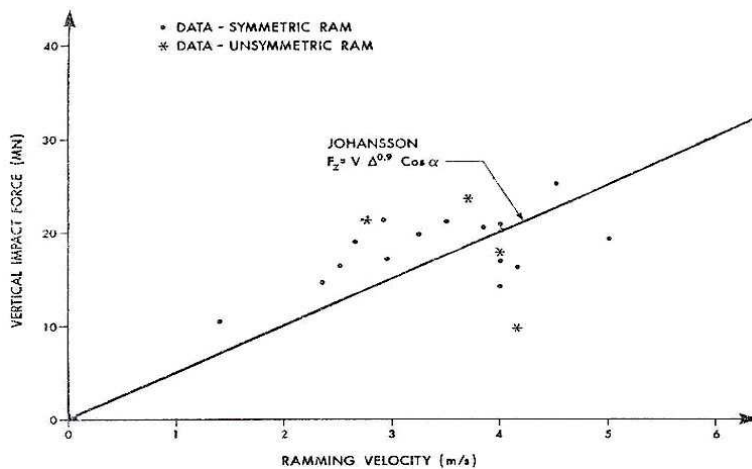


Fig. 3-7 Global ice loads vs. ramming speed for Canmar Kigoriak (Ghoneim et al., 1984)

Fig. 3-7에서 Kigoriak호의 빙하중 자료를 보면 전체 빙하중이 충돌속도에 비례한다는 것을 알 수 있다. Johansson et al.(1981)은 Canmar Kigoriak호와 유사한 선형을 가진 선박에 대하여 전체 빙하중을 $F_{max} = V \Delta^{0.9}$ 로 추정하였다. 빙하중 추정식에 관한 설명은 3.2절에서 자세히 다루도록 하겠다.

Canmar Kigoriak호의 시험항해를 통해 전체 빙하중의 속도 의존성을 알 수 있었으며, 다년생빙에서의 항행 시 충격 빙하중을 받으면 Kigoriak호와 같은 북극해용 쇄빙선의 경우라도 종강도(longitudinal strength)가 충분하지 않다는 것을 보여주었다. 이러한 결과는 이후 CASPPR 개정 시 상당 부분 반영되었다.

Table 3-3 Global ice loads vs. ramming speed for Canmar Kigoriak

Ship Speed(m/s)	Global Loads(MN)	Data Sources
1.41366	10.4263	1983 measured data <i>Ghoneim et al.(1984)</i> <i>15 Symmetric Ram</i> <i>4 Unsymmetric Ram *</i>
2.37067	14.5928	
2.52774	16.3084	
2.65881	18.8818	
2.96047	17.1254	
2.93447	21.2407	
3.26214	19.7396	
3.50763	21.1182	
4.00589	14.1639	
4.01422	16.8701	
4.17545	16.2267	
4.01422	20.8118	
3.85194	20.5157	
4.53017	25.1519	
5.01907	19.229	
4.16297	9.7013 *	
4.01006	17.8095 *	
3.71359	23.5588 *	
2.76907	21.2407 *	

(3) Canadian OBO Carrier "MV Arctic"

MV Arctic호는 Arctic class 2 등급의 bulk carrier로서 캐나다 북극해의 천연자원 개발이 활발하게 진행됨에 따라 이들 자원을 운송하기 위한 목적으로 1978년 건조되었다. MV Arctic호는 광물운반선으로서 일반 화물선과 달리 북극해에서 7월부터 8월 초까지의 운항가능 시기를 11월까지 연장할 수 있었다. 하지만 북극점 부근에 새로운 남/아연 광산이 개발되면서 MV Arctic호를 oil/bulk/ore carrier (OBO) 운반선으로 변경하기 위해 1982년 선박의 기존 선수 형상과 선체 중앙부를 개조하여 CASPPR class 4 등급으로 강화하였다.

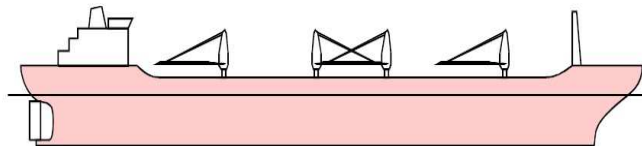


Fig. 3-8 MV Arctic

선수부의 쇄빙능력을 강화시켜 새롭게 고안된 MV Arctic호는 Arctec Canada Ltd.(ACL), 독일의 HSVA, 핀란드의 WARC 총 3곳의 빙해수조에서 새로운 선형설계를 위해 모형시험을 수행하였다. 모형시험을 통해 플레어각(flare angle)은 가능한 크게 하면서 수선면각(waterline angle)은 줄이고, 선수각(stem angle)은 30°부근으로 감소시켜 빙저항 성능을 크게 향상시켰다. 개조된 쇄빙상선 MV Arctic호의 제원은 Table 3-4와 같다.

Table 3-4 Dimension of the MV Arctic

선박 제원	길이(Length)	L_{pp} (m)	206.0
	폭(Moulded Breadth)	B (m)	22.9
	깊이(Moulded Depth)	D (m)	15.2
	흘수(Draft)	d (m)	11.1
	배수량(Displacement)	Δ (tons)	38,104
	재화중량(Deadweight)	DWT (tons)	28,373
선박 성능	기관출력(Engine Power)	(shp/MW)	14,820/10.9
선수 형상	선수각(Stem Angle)	γ (deg)	30.0
	선수선형(Bow Type)	Melville bow (inclined wedge)	
빙등급	Ice class	CASPPR class 4	

캐나다 ACL에서는 선박과 얼음의 충돌 시 선박의 선수부에 작용하는 빙하충을 측정하기 위해 Froude 상사법칙을 이용해 MV Arctic호의 1:40 축척의 모형선을 제작하여 모형시험을 수행하였다.

ACL에서의 모형시험에서는 다년생빙과의 충돌을 가정해 얼음과 비슷한 재료특성을 가진 합성빙 MODICE를 사용하였다. 모형선은 선수부에 작용하는 충격 빙하충과 선체의 거동형태, 굽힘모멘트를 추정하기 위하여 12개의 조각으로 분리된 flexible type을 사용하였다. 각각의 선체 조각은 스프링과 힌지로 연결되어있으며, 모형선 각 조각의 중간에 부착된 strain gauge를 통해 종방향의 굽힘모멘트 분포를 알 수 있다 (Fig. 3-9). Fig. 3-10에는 MV Arctic호의 모형시험으로부터 얻어진 전체 빙하충 자료를 실선 규모로 확장한 것이 나타나 있다.

MV Arctic호의 실선시험은 1984년 6월 북위 76도, 서위 78도 Baffin만의 Coburg섬 근처에서 수행되었다. 모두 9개의 다년생빙과 충돌하는 동안 142번의 충격쇄빙이 이루어졌으며, 이 중 30번의 충격쇄빙은 속도가 0.26~2.1m/s의 범위 내에서 이루어졌다. 이때 얼음은 대체로 crushing에 의해 파괴되었으며, 경사진 wedge type의 선수부 형상 때문에 접촉면적은 아주 작은 편이었다. Fig. 3-11에는 MV Arctic호의 실선시험에서 얻어진 수직방향의 빙하중과 선속과의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 점선으로 표시된 것은 실선시험을 통해 얻어진 수직 빙하중 값의 범위를 best-fit 곡선으로 표현한 것인데, 속도가 증가하면서 전체 빙하중이 조금씩 감소함을 알 수 있다.

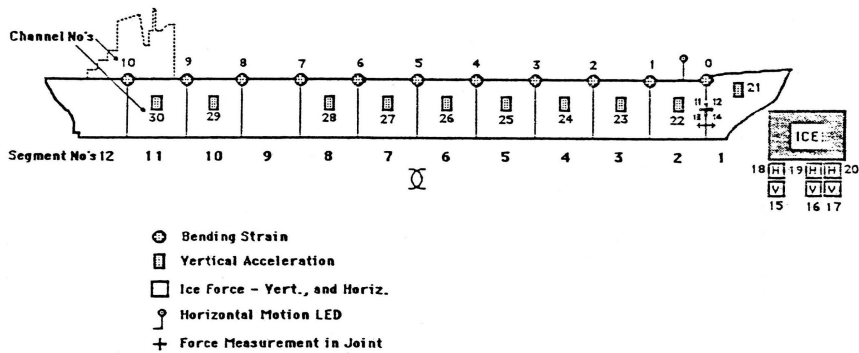


Fig. 3-9 Strain gauge placement on the MV Arctic model (Daley et al., 1986)

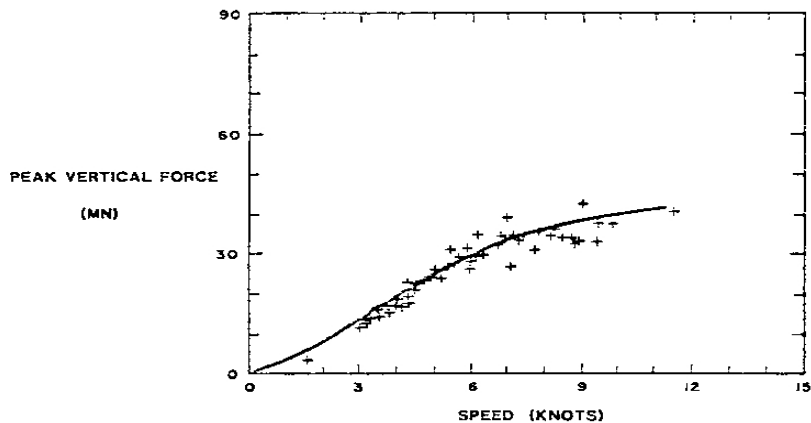


Fig. 3-10 Estimated peak vertical force vs. ship speed for MV Arctic derived from model test (Daley et al., 1986)

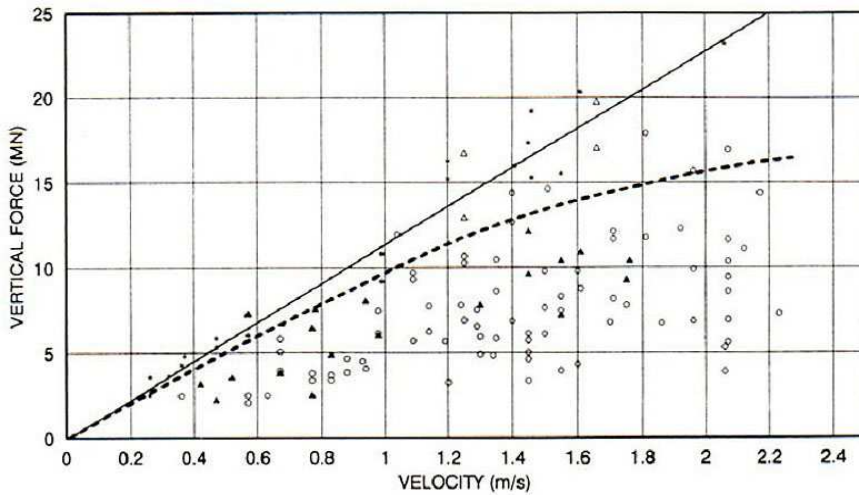


Fig. 3-11 Maximum total vertical forces vs. ramming speed for the MV Arctic (German and Milne/VTT, 1985; Masterson and Frederking, 1993). (*)Good rams, (O)major break, (Δ)old notch, (▲)unsymmetric.

(4) U.S. Coast Guard Icebreakers "Polar Sea" and "Polar Star"

1970년대 Alaska 서쪽 해안과 캐나다 북극해의 석유탐사를 위해 빙해역을 운항 가능한 선박에 대한 건조의 필요성이 대두되었다. Polar class 쇄빙선은 Alaska 서쪽 해안과 캐나다 북극해 운항 시 선박이 받게 될 빙하중과 이 지역의 빙상환경을 조사하기 위해 사용된 선박으로서, 1976년과 1978년 빙해역에서 자항 가능하며 1.8m의 평탄빙에서 쇄빙능력을 갖춘 Polar class 쇄빙선 2척 Polar Star와 Polar Sea가 건조되었다. Polar class 쇄빙선의 제원은 Table 3-5와 같다.

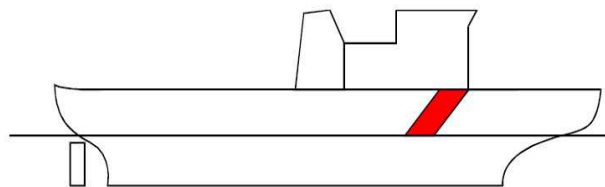


Fig. 3-12 USCGC Polar Sea

Table 3-5 Dimension of the Polar Sea

선박 제원	길이 (Length)	L_{pp} (m)	107.3
	폭 (Moulded Breadth)	B (m)	25.5
	흘수 (Draft)	d (m)	8.5
	배수량 (Displacement)	Δ (tons)	13,190
선박 성능	기관출력 (Engine Power)	(shp/MW)	93,000/44.8
선수 형상	선수각 (Stem Angle)	γ (deg)	22.5
	선수선형 (Bow Type)	wedge-shaped bow	
빙등급	Ice class	1.8m 평탄빙 연속쇄빙	

Polar class 쇄빙선은 빙하중과 빙압력을 측정하기 위해 선수부에 strain gauge를 설치하여 1982년 9월과 10월(여름철) Beaufort해에서 다년생빙과의 충돌과 1983년 3월과 4월(겨울철) Chukchi해에서 1년생빙과 다년생빙과의 충돌에서 선박에 작용하는 빙하중과 빙압력을 측정하였으며, 이 기간 동안 1400개의 충돌 데이터를 확보하였다.

Fig. 3-13에서처럼 실선 계측 시 선체에 작용하는 전체 빙하중을 측정하기 위해 얼음과의 충돌 시 가장 큰 빙하중이 발생할 것으로 판단되는 지점을 중심으로 경사늑골(cant frame)에 대해 각 늑골의 8곳에 strain gauge를 부착하여 10개의 경사늑골에 대해 총 80개의 strain gauge를 부착하여 얼음과의 충돌에 의한 압축변형을 측정하였다. 여기서 60개의 strain gauge 패널은 동시에 9.1m²까지 측정이 가능하며, 각 strain gauge의 측정 면적은 0.15m²이다. Fig. 3-14에는 1983년 겨울철 Chukchi해에서 Polar Sea 쇄빙선에 의해 측정된 전체 빙하중과 선속에 대한 자료가 정리되어 있다.

Polar Sea 쇄빙선은 1984년 겨울철 Beaufort해와 Chukchi해의 시험운항을 통해 총 337개의 사건이 기록되었으며, 이중 32개는 다년생빙과의 충돌에 의한 것이었다. 이때 기록된 빙하중 데이터들은 1982년도 Beaufort해의 시험항해와 비교되는데, 1982년도에 비해 빙상조건이 훨씬 온화했기 때문에 빙하중 데이터 역시 1982년에 비해 작은 값이 얻어졌다. 1982년에 측정된 최대 빙하중은 4.9MN이었고 1984년에는 3.7MN이 기록되었다. 작은 면적에 작용한 빙압력도 1982년에는 최고 11.1MPa이었지만 1984년에는 7.2MPa 정도였다. Fig. 3-15에는 Polar Sea 쇄빙선의 1984년 Beaufort해와 Chukchi해의 항해에서 기록된 337개의 충돌 이벤트에서 추출한 최대 빙압력 데이터를 선박의 속도에 따라 정리하였다.

Polar Sea 쇄빙선의 1984년 1월에 수행된 남극해 McMurdo 기지까지의 항해는 남극의 여름철에 해당하였으며, 빙상조건은 대체로 1년생빙 위주로 일부 다년생빙이 섞여 있는 두께 1~2m의 평탄빙이었다. Fig. 3-16에는 Polar Sea 쇄빙선의 1984년 남극해 항해에서 기록된 최대 빙하중 데이터를 선박의 속도에 따라 정리하였다.

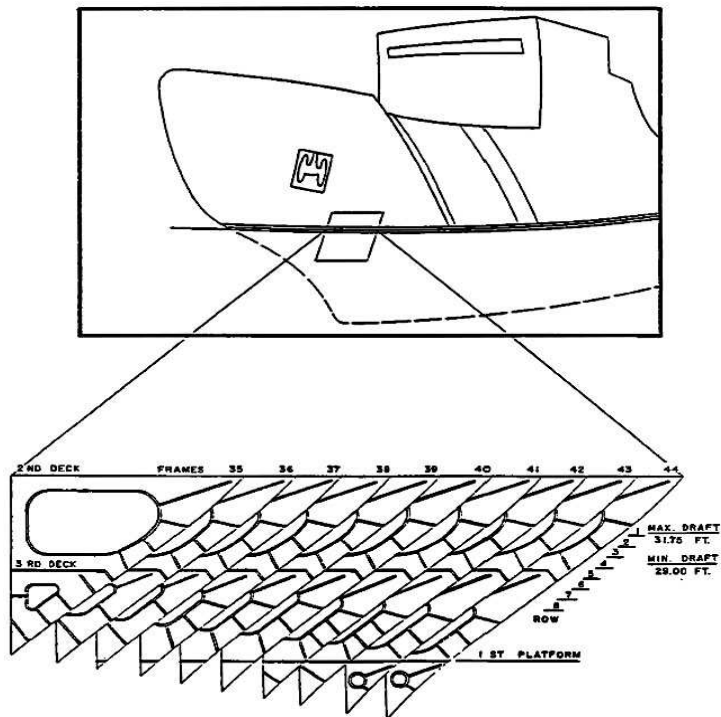


Fig. 3-13 Strain gauge locations for instrumented bow panel aboard Polar Sea (SNAME SSC Report No.340, 1990)

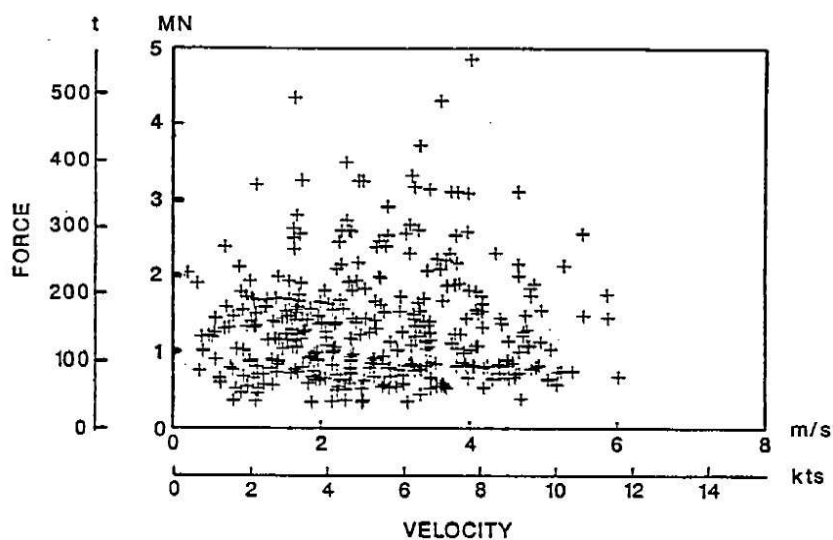


Fig. 3-14 Measured total ice force vs. ship speed from 1983 North Chukchi data (SNAME SSC Report No.340, 1990)

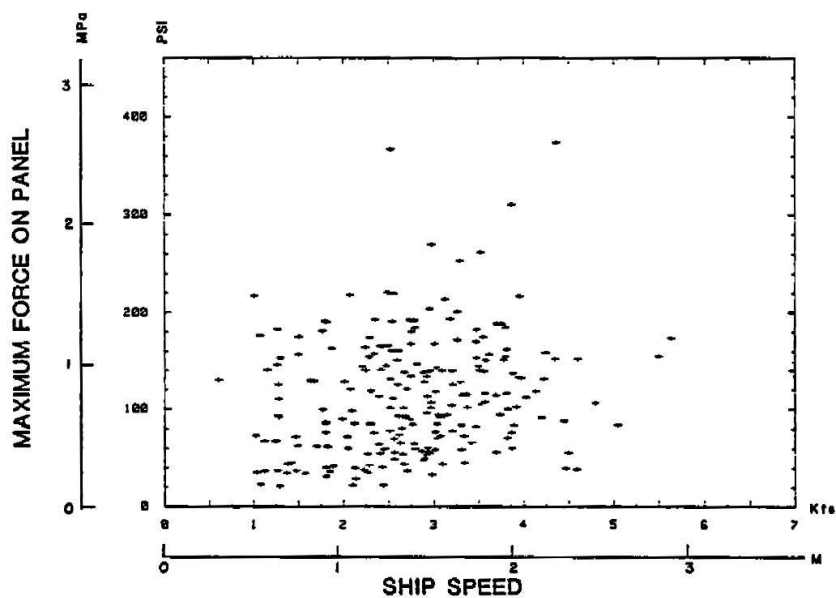


Fig. 3-15 Measured total panel peak force vs. ship speed from 1984 Polar Sea trials (SNAME SSC Report No.339, 1990)

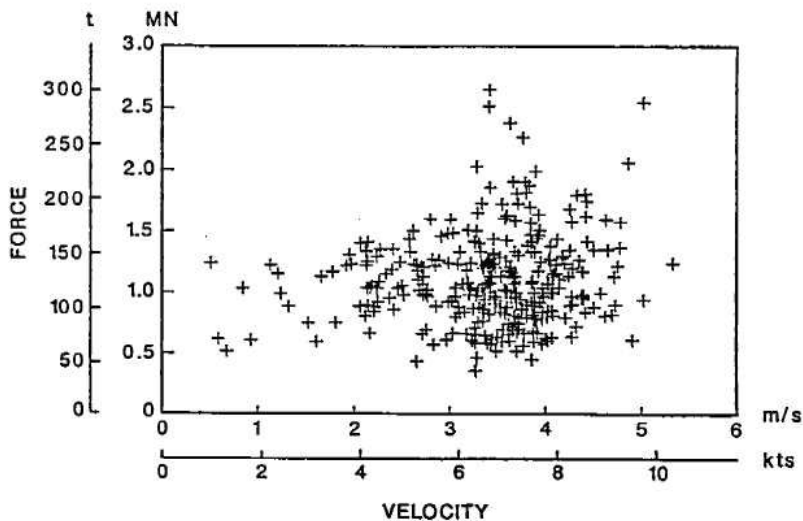


Fig. 3-16 Measured total ice force vs. ship speed from 1984 Polar Sea Antarctic data (SNAME SSC Report No.340, 1990)

북극해를 운항하는 동안 선박과 얼음의 충돌 시 선체의 strain data와 선박의 속도를 함께 측정하기 strain gauge를 추가적으로 설치하였다. 이러한 작업을 통해 Chukchi해의 1년생빙에서 351개의 충돌 이벤트가 발생하였을 때, 선박의 충돌속도가 함께 기록되었다. Fig. 3-17은 극한 빙하중과 선속의 관계를 보여주고 있는데, 여기서 선박의 속도가 증가하면 극한 빙하중 또한 증가함을 알 수 있다. 하지만 이러한 경향은 속도의 범위가 7knots(3.6m/s)까지인 경우에 해당하며, 당시 측정된 1년생빙의 최대 두께는 1.2~1.8m 정도였다.

Polar class 쇄빙선은 Chukchi해를 운항하는 동안 두께가 10m에 이르는 9개의 두꺼운 빙맥(ice ridge)과도 충돌하였는데, 전체 충돌 이벤트 중 61개가 이러한 빙맥을 통과하면서 기록된 것이다. 또한 충돌속도가 9knots(4.6m/s)까지는 이러한 다년생빙과의 충돌에 의해 측정된 결과이다. Fig. 3-18을 보면 1년생빙과는 달리 다년생 빙맥 통과 시에는 속도가 증가하면 전체 빙하중이 지속적으로 커짐을 알 수 있다.

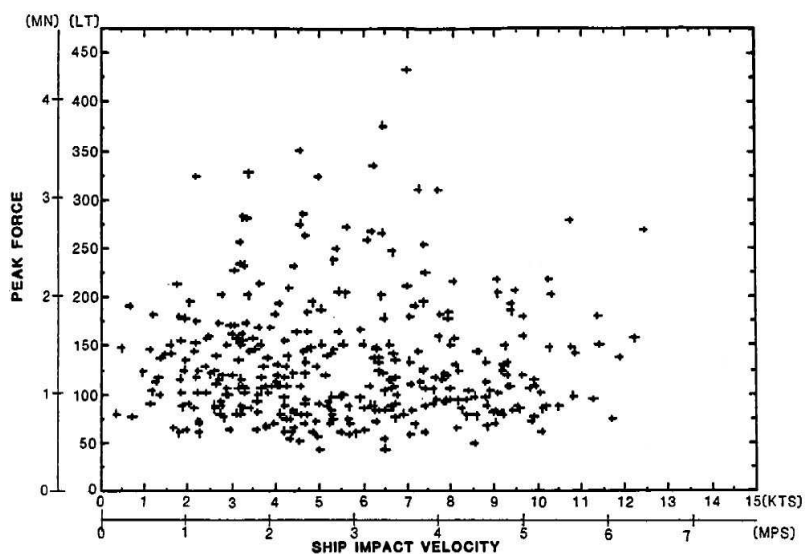


Fig. 3-17 Peak force vs. ship speed for first-year events (SNAME SSC Report No.329, 1990)

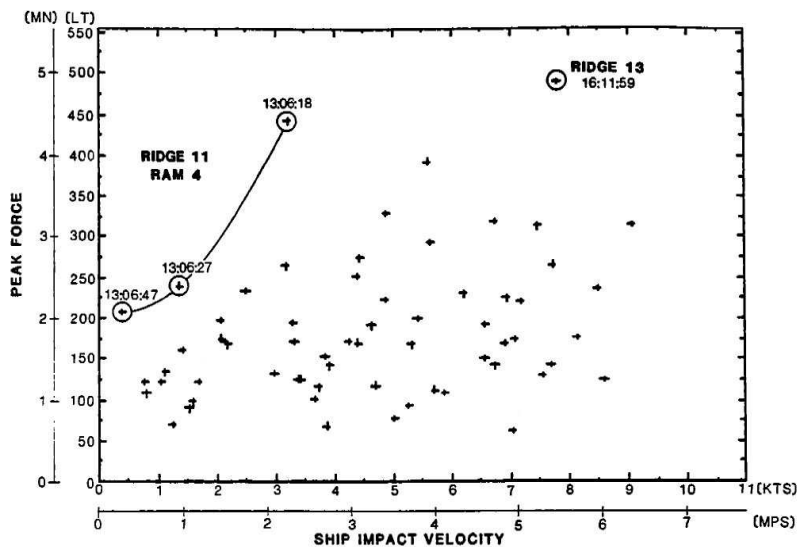


Fig. 3-18 Peak force vs. ship speed for multi-year events (SNAME SSC Report No.329, 1990)

1985년 9월과 10월에는 Beaufort해에서 두꺼운 빙맥과의 충돌 시 선박에 부착된 bending strain gauge를 통해 얻어진 종방향의 굽힘모멘트와 전단력 분포 등으로부터 선수부에서의 응력과 빙하중을 계산하였으며, 이를 통해 선박과 얼음의 상호작용 과정을 이해하는데 많은 도움이 되었다. 1985년 Polar Sea 쇄빙선의 데이터와 1986년 Polar Star 쇄빙선의 전체 빙하중 자료를 Fig. 3-19와 Table 3-6에 정리하였다.

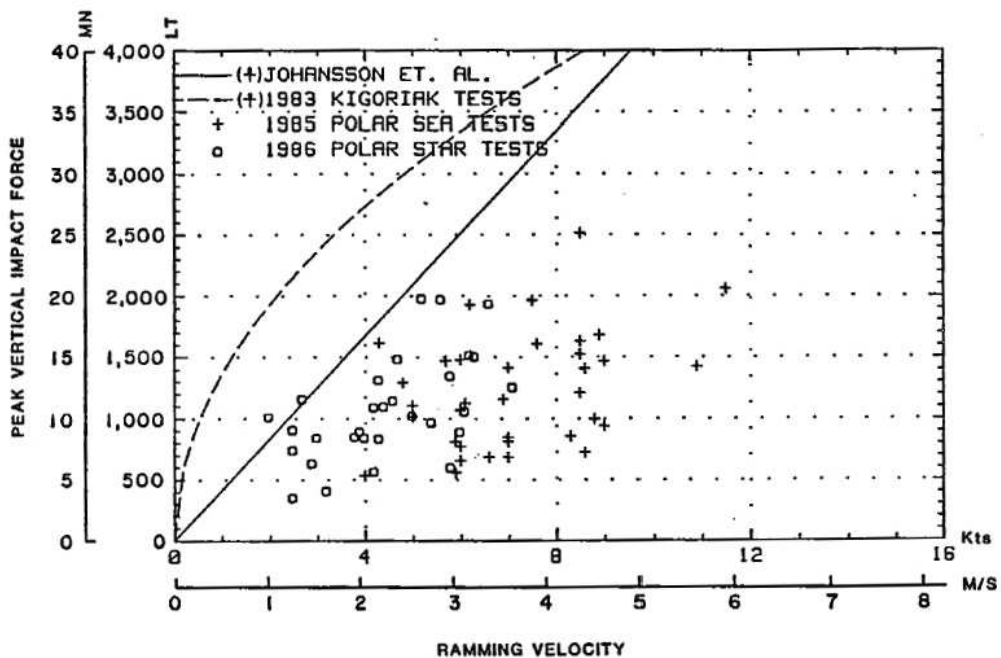


Fig. 3-19 Global ice loads vs. ramming speed for Polar Sea 쇄빙선 and Polar Star (SNAME SSC Report No.343, 1990)

Table 3-6 Global ice loads vs. ramming speed for Polar class icebreakers

<i>Ship Speed (m/s)</i>	<i>Global Loads (MN)</i>	<i>Data Sources</i>	<i>Ship Speed (m/s)</i>	<i>Global Loads (MN)</i>	<i>Data Sources</i>
1.6	4.19	<i>1985-86 Data SNAME SSC Report No.341 No.343 (1990)</i>	3	8.01	<i>1985-86 Data SNAME SSC Report No.341 No.343 (1990)</i>
1.3	3.63		3.1	11.17	
1.3	9.14		3.6	8.03	
1.3	7.49		3.6	14.04	
2.4	14.9		3.6	6.77	
1	10.21		4	7.14	
2.6	10.3		2.1	5.26	
2.7	19.82		2.2	16.04	
2.9	19.74		2.6	14.06	
2.3	11.05		4.4	16.18	
3	6.09		3.1	14.68	
2.2	13.21		2.5	12.86	
2.2	10.98		3.5	11.47	
1.5	6.43		4.4	12.36	
3.7	12.62		3.1	10.59	
3.2	15.23		4.5	9.87	
2.8	9.76		3.6	8.38	
2.2	5.75		3.9	19.52	
2.1	8.5		4.6	14.58	
3.1	8.99		3.1	7.65	
2	8.6		2.6	10.97	
1.4	11.65		2.6	10.05	
2.2	8.43		5.9	20.44	
2	9		5.6	14.13	
1.5	8.5		3.4	6.77	
2.4	11.52		4.6	9.31	
3.4	19.38		3.1	6.48	
3	13.53		3.2	19.16	
3.1	10.66		4.4	24.97	
3.2	15.09		3.9	15.97	
4.3	8.48				
4.6	16.66				
4.4	15.11				
3	5.5				
4.4	13.97				

(5) Swedish Icebreaker "Oden"

1988년 건조된 스웨덴 쇄빙선 Oden호는 북극해를 연중 단독 운항하며 조사 및 연구와 함께 다른 선박의 유도쇄빙선의 역할을 수행하도록 고안되어 Swedish National Maritime Administration(SNMA)의 지원으로 스웨덴 GVA사와 캐나다 Canmar사가 공동 설계한 선박이다.

Oden호는 선수부가 wedge type인 기존 쇄빙선과는 달리 선수부가 상륙정(landing craft)과 같은 형태로서 쇄빙능력을 크게 향상시키고 늑골간격과 선체 외판의 두께를 증가시켜 빙하중을 충분히 견딜 수 있도록 건조되었다. 특히 선체의 50% 이상을 항복강도가 490MPa 이상의 고장력강(EHS steel)을 사용함으로써 늑골사이의 종방향 스트링거 개수를 줄여 늑골간격을 850mm로 증가시키고 구조적으로 단순화시켜 선박의 건조비용을 낮추었다. 또한 선수부에 선폭보다 5m 더 넓은 reamer를 부착하여 얼음과의 충돌 시 선수부에 대부분의 빙하중이 발생하도록 하며, 다년생빙에서 10knots(5.14m/s) 속도로 충격쇄빙이 가능하도록 하였다. 이는 선체의 heeling system과 함께 선회 시 폭이 더 넓은 수로를 만들 수 있다 (Fig. 3-20, Fig. 3-21). Oden호의 제원은 Table 3-7과 같다.

Table 3-7 Dimension of the Oden

선박 제원	길이(Length)	L_{pp} (m)	107.8
	폭(Moulded Breadth)	B (m)	25.0/29.4(reamer)
	깊이(Moulded Depth)	D (m)	12.0
	흘수(Draft)	d (m)	7.0-8.5
	배수량(Displacement)	Δ (tons)	13,000
선박 성능	기관출력(Engine Power)	(shp/MW)	24,500/18.0
선수 형상	선수각(Stem Angle)	γ (deg)	22
	선수선형(Bow Type)	spoon-shaped bow (flattened section)	
빙등급	Ice class	DnV 1A1 Polar-20 CASPPR class 10	

Oden호는 1989년 발틱해 Bothnia만과 북극해 Greenland 동부 해안에서 시험 운항을 수행하였다. 발틱해의 시험 운항에서는 35채널의 계측장비가 사용되었는데, 선체에 부

착된 strain gauge를 통해 2개의 중방향 선수 늑골부근에서 전단력과 굽힘모멘트, 응력을 측정하였다. 하지만 측정된 자료의 양도 많지 않으며, 빙상조건이 매우 온화했기 때문에 측정된 자료는 빙하중을 이해하는데 있어 그다지 중요하지는 않는 것으로 보인다. 또한 Oden호는 원래 북극해 항해용으로 설계되었기 때문에 발틱해에서의 시험 항해는 측정장비의 검증 이외의 큰 의미는 없었다.

Greenland 해안에서의 시험운항은 다년생빙에서 수행되었으며, 선체에 부착된 strain gauge와 accelerometer 등과 같은 여러 측정장비를 통해 빙하중과 빙압력을 측정하였다. 우선 전체 빙하중을 측정하기 위하여 선수부의 107.5번 늑골에서 선박의 종강도와 관련된 모든 부재에 strain gauge를 설치하였다 (Fig. 3-22). 또한 선수부를 지지하는 중방향의 110번 늑골과 116번 늑골 사이에 15개의 strain gauge를 부착하였다. 그리고 4개의 servo accelerometer를 이용해 충돌 이벤트 시 선체의 강체운동으로부터 전체 빙하중을 측정하였다.

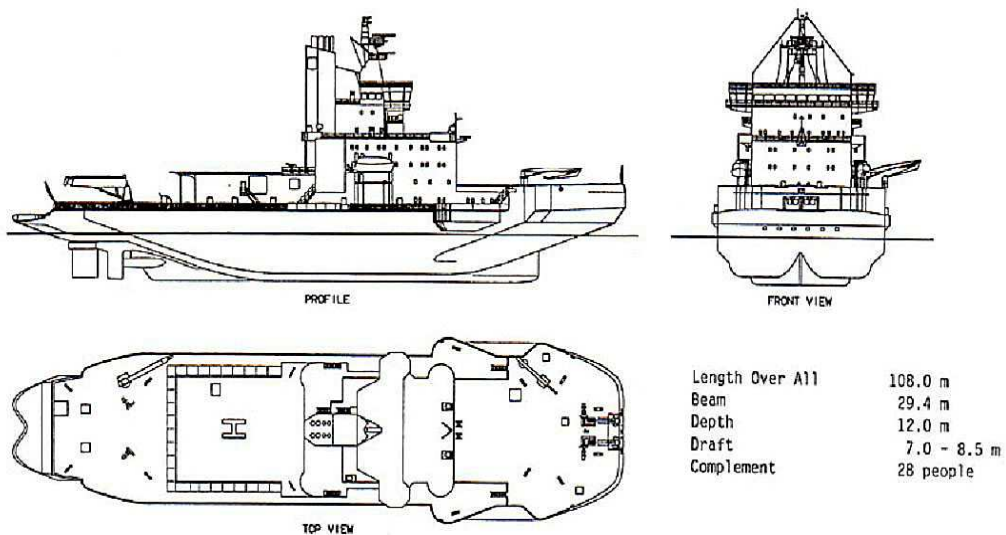


Fig. 3-20 General arrangement of icebreaker Oden (Lindberg et al., 1989)

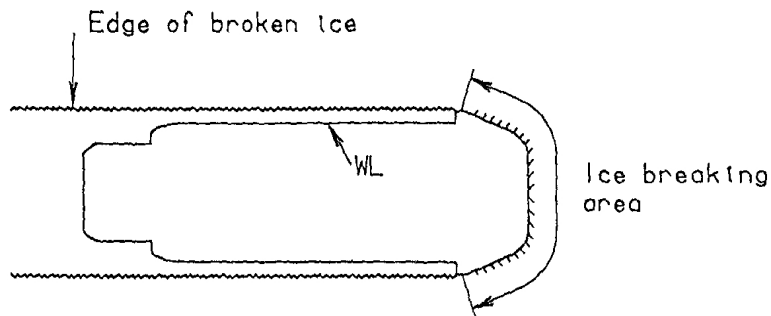


Fig. 3-21 Waterline of icebreaker Oden (Lindberg et al., 1989)

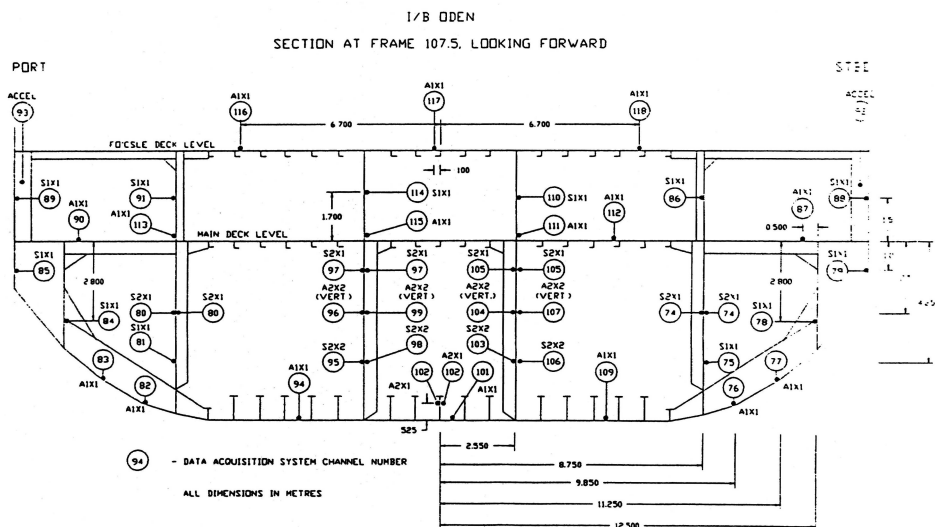


Fig. 3-22 Locations of global load strain gauges at frame 107.5 of Oden (Liljestrom et al., 1990)

Fig. 3-23에는 1989년 10월 Greenland 동부 해안에서의 실선 ramming test에서 얻어진 결과 중 하나가 나타나 있다. 여기서 선수부에 수직하게 작용한 최대 빙하중은 18~19MN 정도로 계측되었는데, 이는 빙상조건이 예상했던 것보다 온화해서 애초 예상했던 40~60MN보다는 훨씬 적었다.

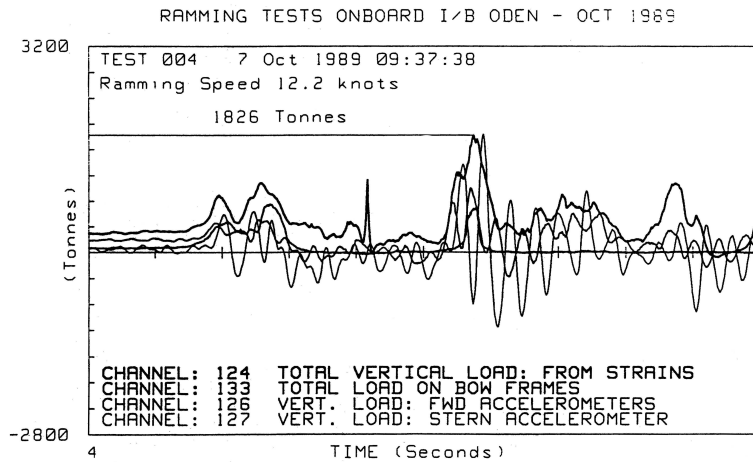


Fig. 3-23 A sample of measured impact load during 1989 Oct. ramming test onboard icebreaker Oden (Liljestrom et al., 1990)

1991년 8~10월 Oden호의 북극점까지 시험 운항에서는 총 800개의 충돌 이벤트가 발생하였다. 여기서 선수부와 선체 거더에 부착된 strain gauge를 통해 선박에 작용하는 수직 빙하중을 측정하였는데, Fig. 3-24에는 4m 두께의 빙판과의 충돌 시 속도별 (1.5m/s, 2.9m/s, 4.6m/s)로 측정된 수직 빙하중 자료가 나타나있다. 여기서 보면 얼음과의 충돌속도가 증가함에 따라 작용하는 빙하중의 크기도 함께 증가함을 알 수 있다.

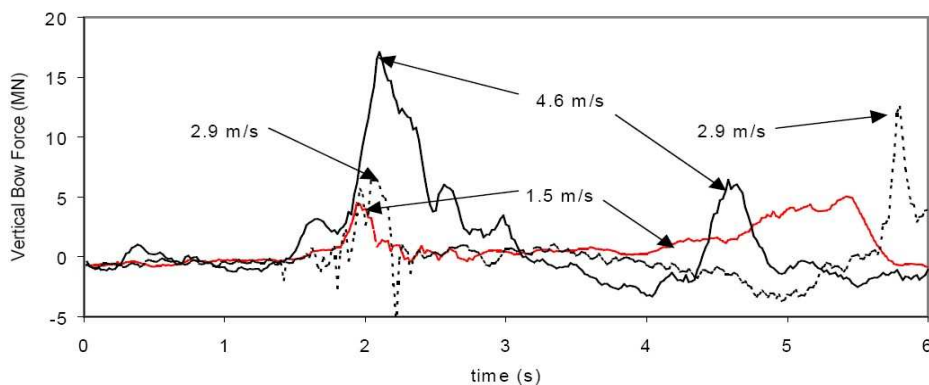


Fig. 3-24 Total vertical bow force on Oden for impacts at three speeds on 4m thick ice (Frederking, 1999)

또한 Oden호는 얼음의 집적도가 7/10~9/10정도이며, 빙판의 두께는 2~3m이고 충돌 속도가 0.04m/s, 0.03m/s인 경우에 대해 2가지 충돌 이벤트가 기록되었다 (Fig. 3-25). 여기서 2개의 충돌 이벤트는 지속시간에 있어 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 이들 자료는 Table 3-8에 정리하였다.

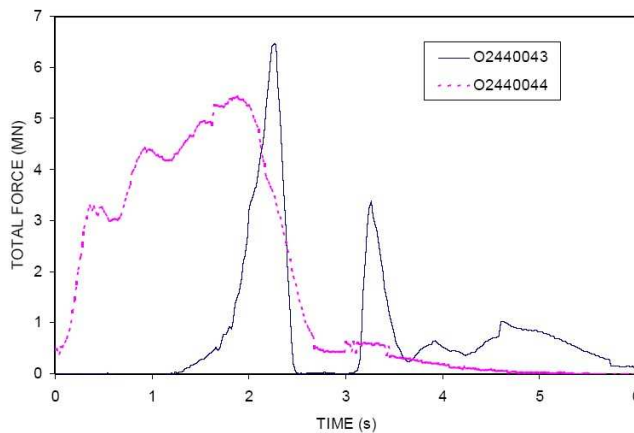


Fig. 3-25 Two samples of measured impact loads during 1991 Oct. Polar voyage (Frederking, 2005)

Table 3-8 Global ice loads vs. ship speed for icebreaker Oden

Ship Speed(m/s)	Global Loads(MN)	Data Sources
0.03	5.47	1994 measured data Frederking (2005)
0.04	6.49	
4.6	17.1	1994 measured data Frederking (1999)
2.9	12.6	
1.5	4.51	

(6) Canadian Coast Guard Icebreaker "Louis S. St. Laurent"

CCGS Louis S. St. Laurent호는 1969년 Canadian Vickers Ltd.에서 건조된 캐나다 해안 경비대의 쇄빙선으로서 규모가 가장 크다. St. Laurent호는 1988~93년 기존 설비를 현대화 하도록 계획되어 Halifax Shipyard Ltd.에서 선박의 길이를 증대시킴과 동시에 새로운 선수 형상과 주기관설비, 항해 장비를 추가로 설치하였다. St. Laurent호는 주로 두꺼운 다년생빙에서의 운항에 이용되었고 캐나다 북극해의 여름철 항해와 겨울철 St. Lawrence만의 Gulf 지역에서 Montreal

과 Quebec 등으로 항해하는 선박의 운항을 돕기 위해 사용되었다. 개조된 쇄빙선 Louis S. St. Laurent호의 제원은 Table 3-9와 같다.

Table 3-9 Dimension of the Louis S. St. Laurent

선박 제원	길이(Length)	L_{pp} (m)	110.32
	폭(Moulded Breadth)	B (m)	23.31
	흘수(Draft)	d (m)	8.53
	배수량(Displacement)	Δ (tons)	12,875
선박 성능	기관출력(Engine Power)	(shp/MW)	27,000/20.1
선수 형상	선수각(Stem Angle)	γ (deg)	17
	선수선형(Bow Type)	wedge-shaped bow	
빙등급	Ice class	CASPPR CAC 3	

St. Laurent호는 미국의 쇄빙선 Polar Sea와 함께 북극해의 빙상정보를 얻기 위한 목적으로 1994년 여름철 북극해를 통과하는 시험항해를 실시하였다. 그리고 태평양에서 대서양으로 북극해를 시험 운항하는 동안 선체에 작용하는 빙하중 데이터를 확보하기 위해 St. Laurent호의 선수부와 선측, 선저부에 총 63개의 strain gauge를 부착하였다 (Fig. 3-26). 특히 선수부에는 24개의 strain gauge를 설치했으며, 선수부 전체 panel의 면적은 $7.2\text{m} \times 3\text{m}$ 이고 빙압력은 30개의 sub-panel에서 계측되었다 (Fig. 3-27 참조). 이러한 strain gauge들은 유한요소 모델(COSMOS/M)의 해석을 통해 최대 변형이 발생할 위치에 부착하여 늑골에서의 전단 변형을 측정하였다.

St. Laurent호의 북극해 항행 시 충돌 이벤트는 strain gauge가 부착된 여러 지점에서 동시에 발생하는 경우도 있었는데, 3,200번의 충돌 이벤트 중 선수부에 1,800번의 충돌 이벤트가 기록되었으며, 이는 단일 항해에서 얻은 선체와 얼음의 충돌 이벤트 중 가장 많은 데이터를 기록하였다. 당시 북극해 얼음의 두께는 대략 1~2m정도였으며, 얼음의 집적도(concentration)는 94% 정도였다. Fig. 3-28은 single small panel(0.72m^2)에 작용한 최대 압력과 panel에 작용한 전체하중을 보여주고 있다. 여기서 single panel에 작용한 압력은 최대하중이 증가함에 따라 함께 증가하는 경향을 나타내고 있다.

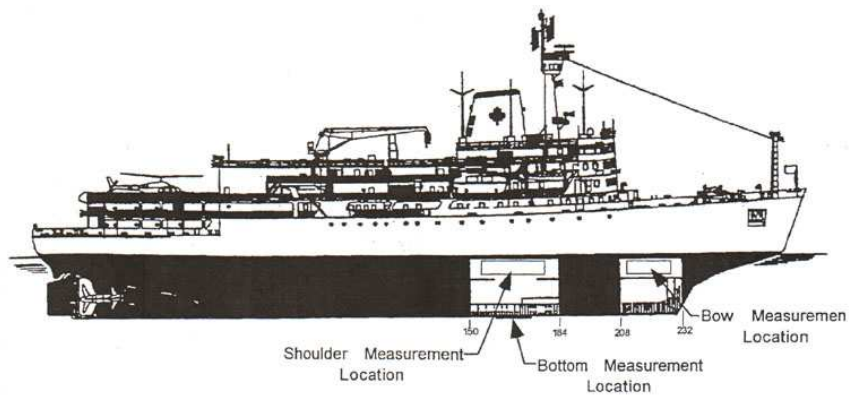


Fig. 3-26 Locations of strain measurement panels onboard Louis S. St. Laurent, 1984 Polar crossing voyage (Ritch et al., 1999)

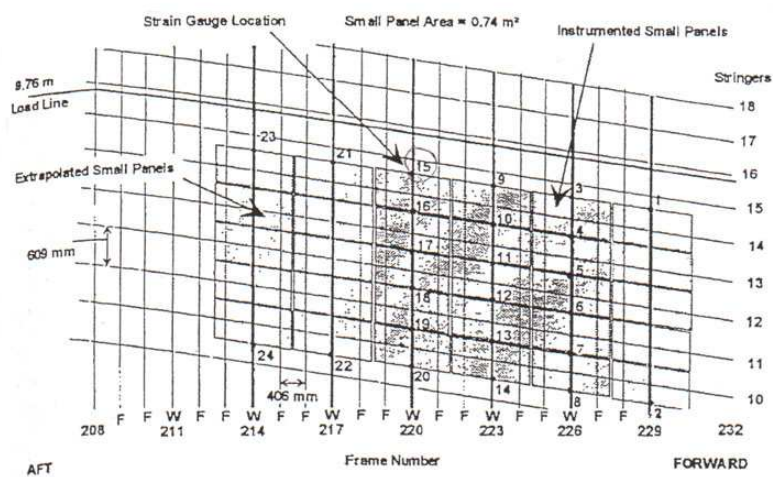


Fig. 3-27 Layout of strain gauges in the bow area (Ritch et al., 1999)

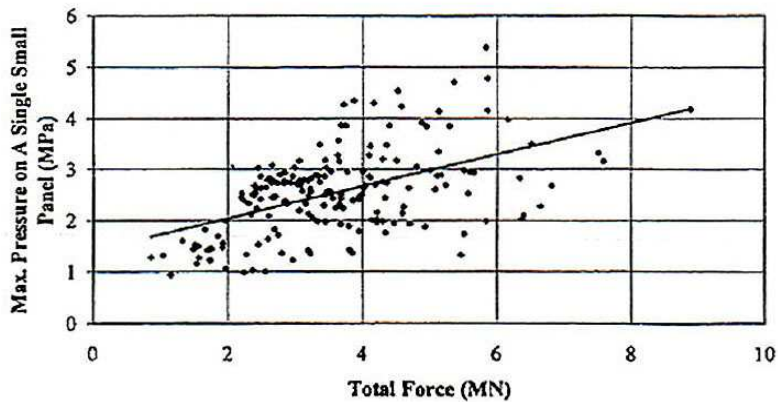


Fig. 3-28 Maximum pressure on a single small panel vs. the total force (Ritch et al., 1999)

St. Laurent호의 북극해 항행시기 동안 다양한 빙상상태와 선박의 속도에 대해 측정된 충돌 이벤트가 기록되었다. 여기서 몇몇 충돌은 얼음과 스치면서 발생한 것도 있었다. Frederking(1999)은 panel에 작용한 전체 빙하중의 변화를 각 sub-panel에 작용한 빙압력의 합을 통해 결정하였다. 또한 Frederking은 충돌 이벤트 중 빙하중과 속도, 얼음의 두께에 따라 충돌 이벤트의 경향이 서로 다르다는 것을 보여 주었다 (Fig 3-29). 6개의 충돌 이벤트 중 3개는 두께가 1~2m인 비교적 얇은 빙판이고 다른 3개는 두께가 4~5m인 두꺼운 빙판에 대한 것인데, 얇은 빙판과 충돌할 경우 전체 빙하중의 최대값은 속도에 영향을 받지 않지만 속도가 낮을수록 충격 지속시간이 더 길다는 것을 알 수 있다. 이와 달리 두꺼운 빙판과 충돌할 경우 속도에 따라 전체 빙하중의 최대값은 현저한 차이를 보이며, 충격 지속시간도 매우 짧다는 것을 알 수 있다.

2000년 10월에는 캐나다 National Research Council - Canadian Hydraulic Centre에서 개발한 전체 빙하중 측정 시스템 "MOTAN"을 St. Laurent호에 설치해 캐나다 북극해를 운항하는 동안 선체에 작용하는 전체 빙하중을 측정하였다 (Fig. 3-30). 이를 통해 북극해를 운항하는 동안 총 42개의 충돌 이벤트가 기록되었으며, 이들 대부분은 2년생빙과 다년생빙에서 측정된 결과이다.

Fig. 3-31은 다년생빙과의 충돌에서 전체 빙하중과 속도 그리고 surge 운동의 관계를 보여준다. 여기서 보면 최대 전체 빙하중은 충돌 시보다 충돌 후에 발생하는데, 이는 충돌 후 얼음과의 접촉면적이 더 증가하기 때문이다. 이때 측정된 전체 빙하중은

17.3, 16.7 15.7MN이고 선박의 속도는 3.2~5.0knots(1.64~2.57m/s)였다.

일반적으로 선박과 얼음의 충돌 시 얼음의 종류에 따라 선박에 작용하는 전체 빙하중은 다르다. Fig. 3-32에는 St. Laurent호가 2년생빙, 다년생빙과의 충돌에 대한 전체 빙하중을 정리하였다. 여기서 보면 1년생빙보다는 2년생빙 또는 다년생빙에서 충돌속도가 증가함에 따라 전체 빙하중도 증가함을 알 수 있는데, 이러한 경향은 다년생빙에서 더욱 잘 나타난다 (Fig. 3-33).

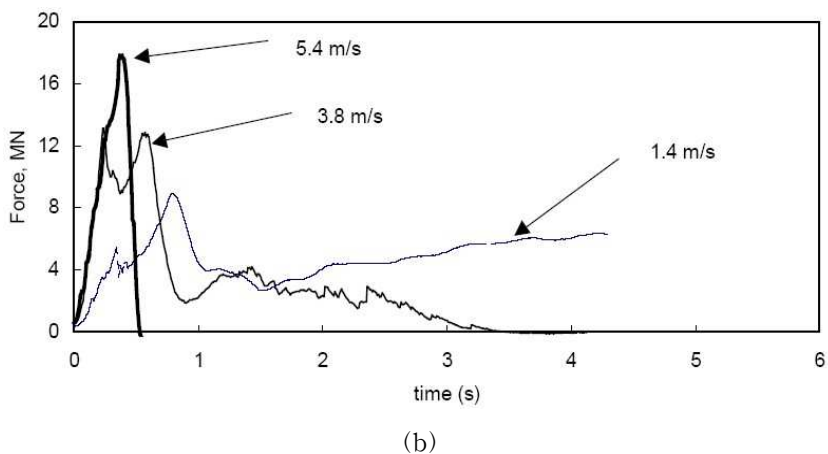
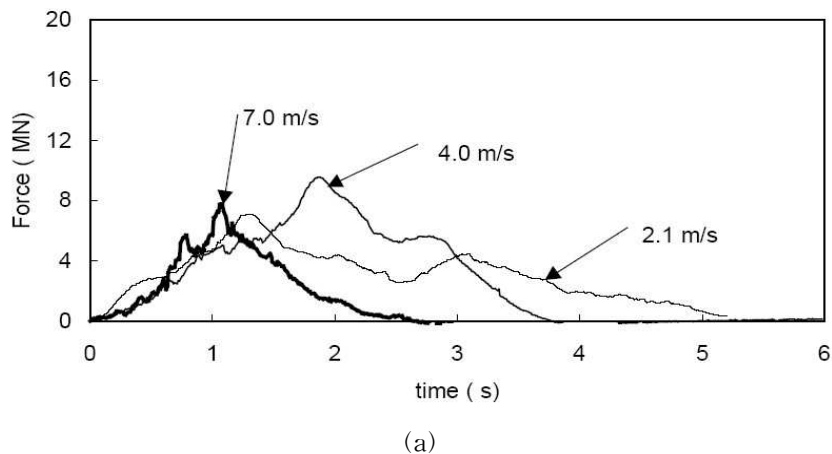


Fig. 3-29 Total impact loads on Louis S. St. Laurent: (a) 1-2m thick ice (b) 4-5m thick ice (Frederking, 1999)

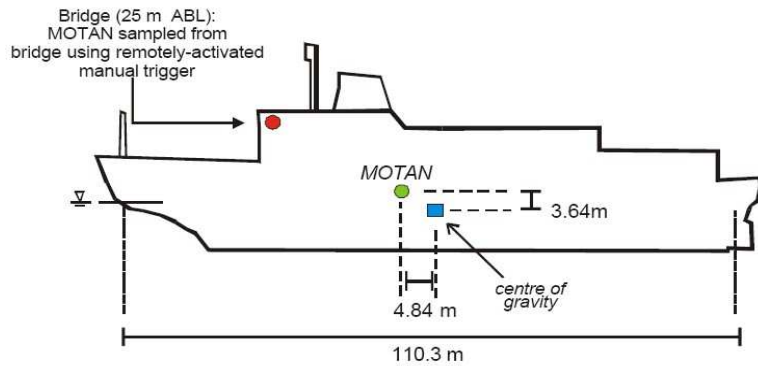


Fig. 3-30 Location of MOTAN system on St. Laurent (Johnston et al., 2003)

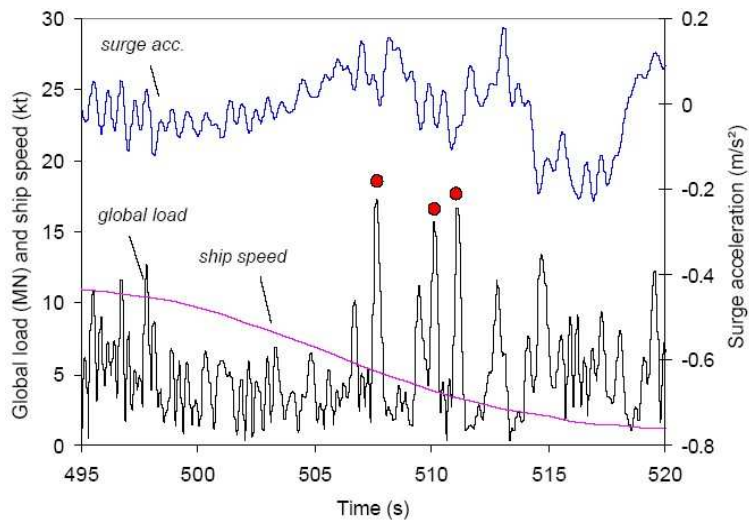


Fig. 3-31 Three highest global ice loads measured from MOTAN system during Louis S. St. Laurent trials (Johnston et al., 2003)

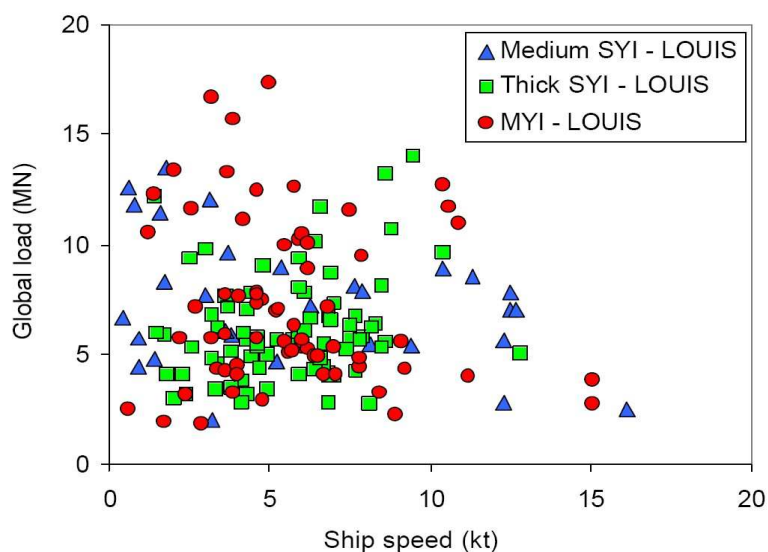


Fig. 3-32 Global ice loads measured from MOTAN system during Louis S. St. Laurent trials, according to ice type (Johnston et al., 2003)

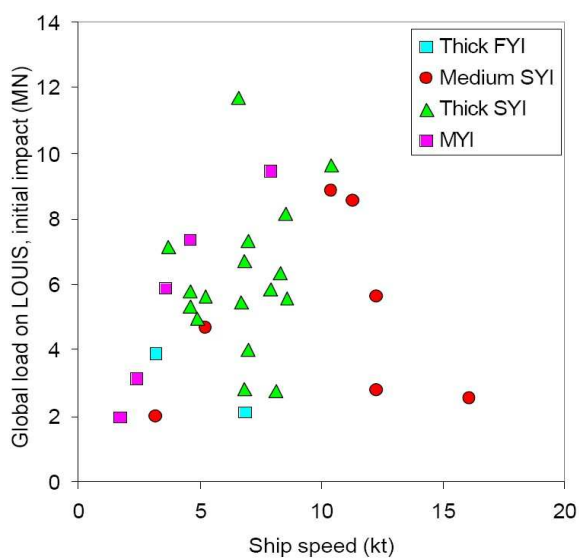


Fig. 3-33 Global ice loads on the Louis S. St. Laurent, according to ice type (Johnston et al., 2003)

(7) U.S. Coast Guard Icebreaker "Healy"

USCG Healy호는 1999년 건조된 미국 해안경비대 소속의 쇄빙선으로서 Polar class 쇄빙선의 후속 모델이다. Healy호는 북극해 및 남극해에서 연구 및 조사활동과 함께 과학기지 물자 수송의 역할을 담당 할 수 있도록 설계되어 선박 내 390m²에 이르는 연구/실험 공간과 함께 50여명의 과학자를 수용할 수 있고 -50°F (-45°C)의 저온에서 작업이 가능하며 추가적으로 군사작전, 수색 구난 업무(search and rescue), 유도쇄빙선의 역할 등을 수행할 수 있다. 실선시험에 사용된 쇄빙선 Healy호의 제원은 Table 3-10과 같다.

Table 3-10 Dimension of the USCG Healy

선박 제원	길이(Length)	L_{pp} (m)	120.85
	폭(Moulded Breadth)	B (m)	24.23
	흘수(Draft)	d (m)	8.53
	배수량(Displacement)	Δ (tons)	15,965
선박 성능	기관출력(Engine Power)	(shp)	30,000
선수 형상	선수각(Stem Angle)	γ (deg)	19
빙등급	Ice class	연속쇄빙 평탄빙 1.5m	

2000년 4월과 5월 미국-캐나다의 국제 공동연구 계획에 의해 캐나다의 Labrador해와 Greenland 서해안의 빙해역에서 시험항해를 수행하였는데, 이 실험을 위해 Healy호에 캐나다 NRC-CHC에서 개발한 MOTAN(*MOT*ion *AN*alysis) 시스템을 최초로 장착하였다. 이 시스템은 선체를 강체로 취급해 빙해역을 운항하는 동안 시간에 따른 선박의 6자유도 움직임을 계측하고 이를 통해 선체의 운동방정식을 풀어 선체에 작용한 전체 빙하중을 계산하는 시스템이다 (Fig. 3-34, Fig. 3-35, Fig. 3-36 참조).

MOTAN 시스템은 크게 센서와 컴퓨터 프로그램으로 구성되어 있다. 센서의 크기는 26cm × 16cm × 10cm 이며, 무게는 1.88kg으로서 휴대가 가능해 선체의 임의 위치에 손쉽게 설치할 수 있기 때문에 편리하다. 컴퓨터 프로그램은 운동 방정식을 사용해서 선박의 6자유도 움직임에 대한 변위와 속도, 가속도를 계산한다. MOTAN 시스템은 현재까지 선체의 운동과 빙하중에 대한 계산 결과가 모형시험이나 다른 계측방법에 의한 결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 검증되었다 (Johnston et al., 2003, Johnston and Gagnon, 2005).

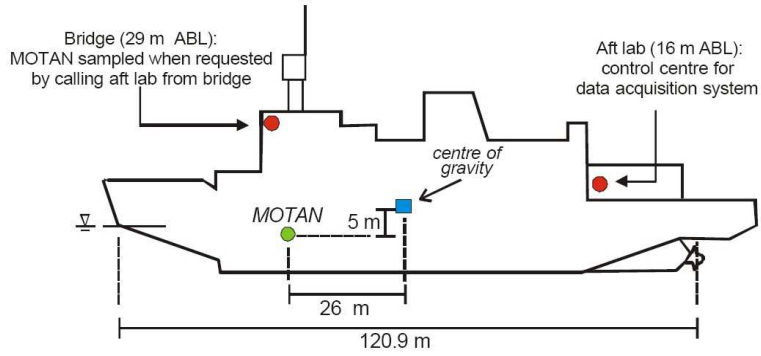


Fig. 3-34 Location of MOTAN system on Healy (Johnston et al., 2003)

선체에 수직하게 작용한 전체 빙하중은 Fig. 3-35에 정의된 바와 같이 세 방향 힘 성분의 벡터 합으로 표시된다.

$$\bar{F} = \sqrt{(F_x)^2 + \left(\frac{M_z}{X_{ab}}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{X_{ab}}\right)^2} \quad (3-1)$$

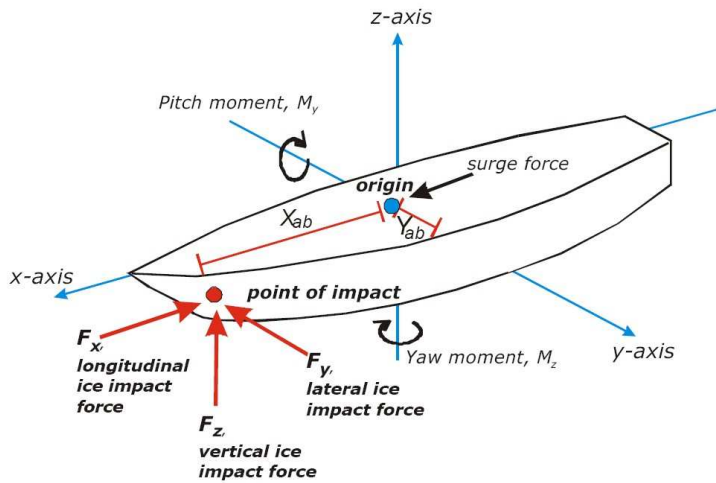


Fig. 3-35 Components used to calculate global ice force (Johnston et al. 2003)

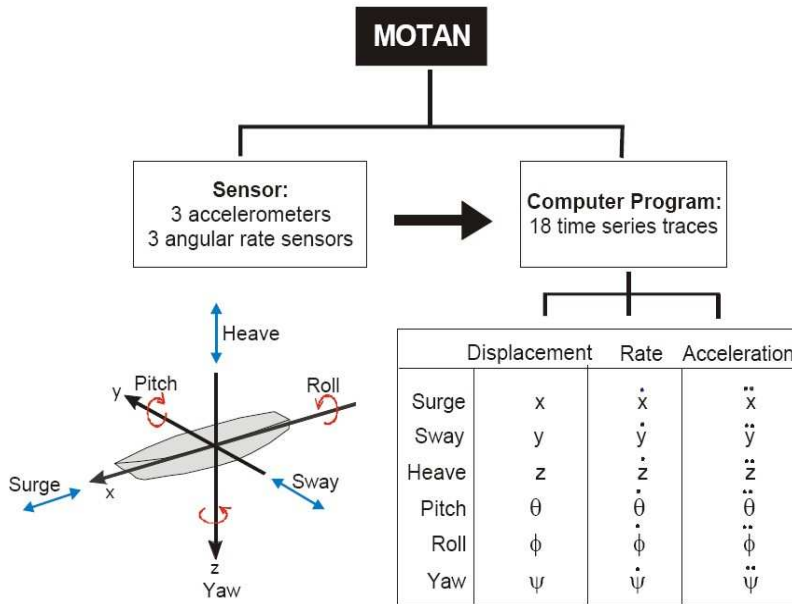


Fig. 3-36 Schematic of MOTAN system (Johnston et al., 2001)

2000년 4월과 5월 Labrador해와 Greenland 서해안에서의 시험항해에서 총 16건의 충돌 이벤트가 기록되었다. MOTAN 시스템을 이용해 선체의 pitching 운동(0.4° 와 0.7°)에 대해 각각 3.8MN과 4.3MN의 전체 빙하중을 계산하였다 (Fig. 3-37). 특히 4.3MN은 heave 운동과 pitch 운동에 의해 계산된 값인데, 이들 전체 빙하중 값은 이전의 다른 실선시험에서 측득된 값과 비슷하다 (1985 Polar Sea: 4~25MN, 1986 Polar Star: max 20MN, 1984 MV Arctic: 4~23MN).

Fig. 3-38은 얼음의 집적도가 9/10이며 중간상태의 1년생빙에서 측득된 값이다. 여기서 첫 번째 충돌(H14_1)은 320s에 발생했으며, 이때 선박의 속도는 9knot(4.63m/s)에서 4.6knots(2.36m/s)로 감소되었다. 이때 전체 빙하중은 4.3MN이었으며, pitch 운동(0.52°)과 roll 운동(2.9°)이 발생했다. 두 번째 충돌(H14_2)은 Healy호가 5.8knots (2.98m/s)의 속도로 충돌한 경우인데, 이때는 367s에서 4.9MN의 전체 빙하중이 발생했다. 두 번째 경우 첫 번째보다 충돌속도가 빨랐기 때문에 보다 큰 전체 빙하중이 발생했다. Healy호의 시험항해는 대부분이 1년생빙에서 수행되었기 때문에 이전의 Polar Sea, Polar Star, MV Arctic호의 다년생빙과의 충돌에 의해 발생한 전체 빙하중보다는 작은 값이다.

Fig. 3-39와 Fig. 3-40에는 동일한 MOTAN 시스템을 장착해 시험항해한 Louis S. St. Laurent호와 Healy호의 계측결과를 정리하였다. St. Laurent호의 계측결과는 1년생 빙도 해당되지만 주로 두꺼운 다년생빙과 빙맥에서 전체 빙하중을 계측한 것이다. Fig. 3-39를 보면 Healy호와 St. Laurent호는 두꺼운 1년생빙에서 발생한 전체 빙하중의 범위는 1.7~7.0MN이고 충돌속도는 0.5~11knots(0.26~5.65m/s)까지다. Fig. 3-40을 보면 최대 전체 빙하중은 Healy호의 경우 7.6MN이고 St. Laurent호의 경우 17.3MN이다. 특히 St. Laurent호의 경우 1년생빙에서 다년생빙까지 측정된 결과를 모두 포함하고 있어 전체 빙하중과 얼음의 종류에 대한 경향을 파악하긴 힘들지만 일반적으로 얼음의 종류에 따른 전체 빙하중과 속도의 관계가 달라짐을 알 수 있다.

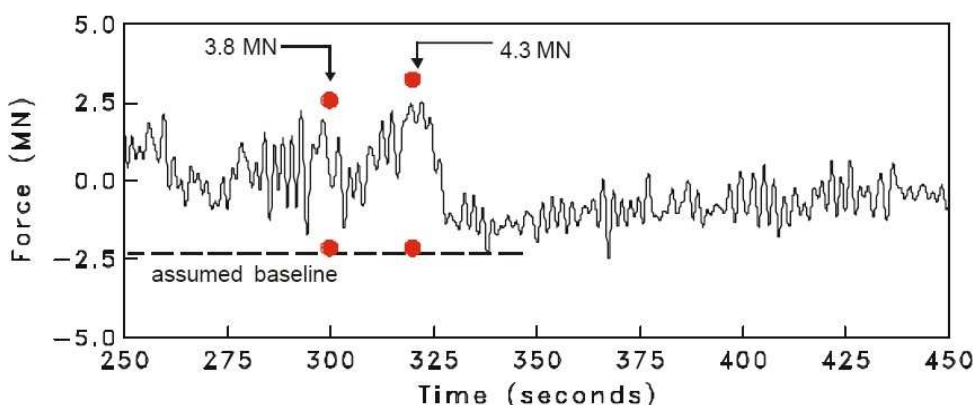


Fig. 3-37 Ridge impact force estimated from MOTAN onboard the Healy (Johnston et al., 2001)

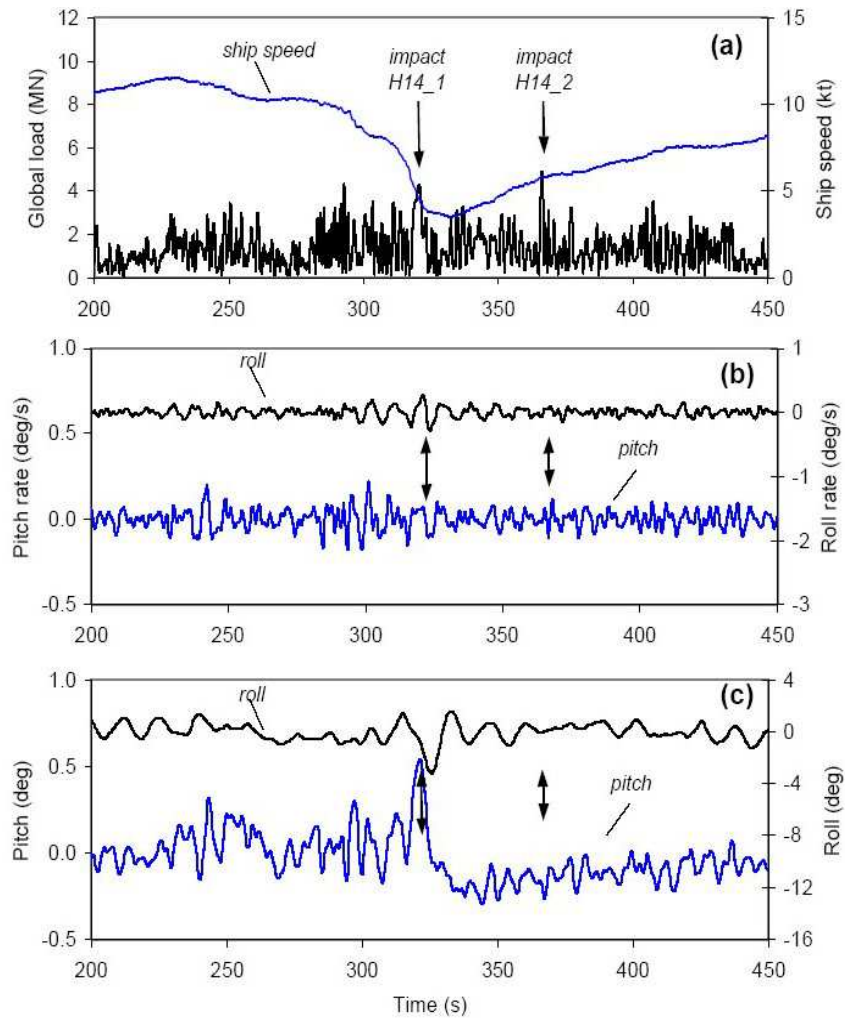


Fig. 3-38 Global ice loads and motions of the Healy during part of Event H14 (Johnston et al., 2003)

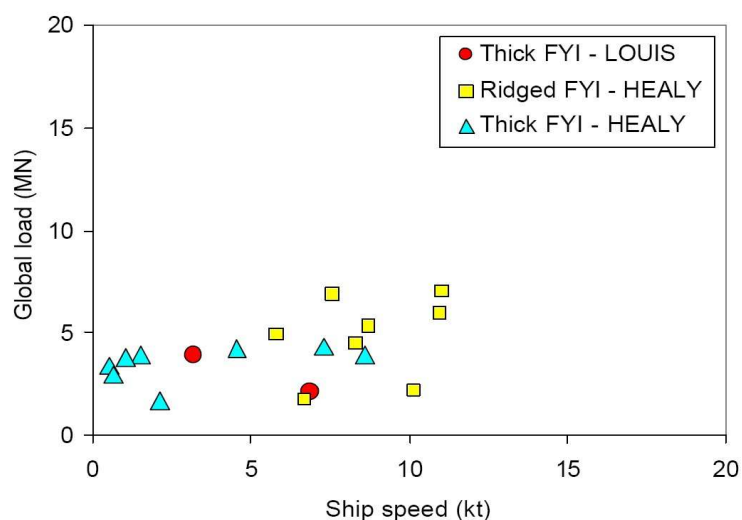


Fig. 3-39 Global ice loads on the Healy and the Louis S. St. Laurent, according to ice type (Johnston et al., 2003)

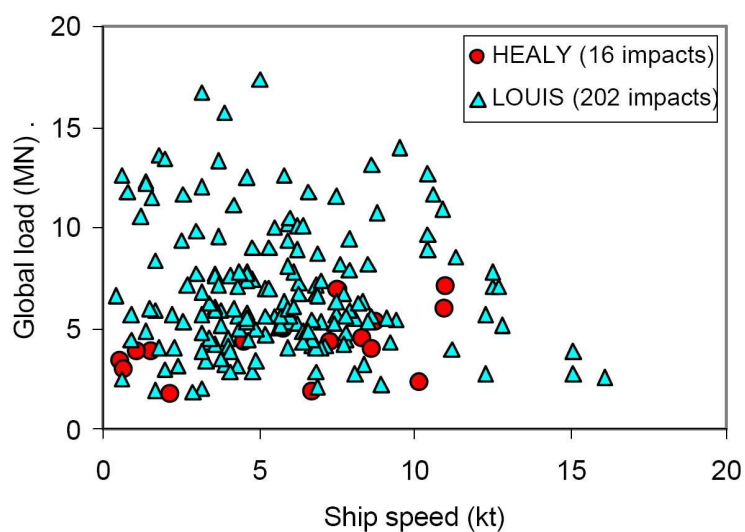


Fig. 3-40 Global ice loads measured on the Healy and the Louis S. St. Laurent (Johnston et al., 2003)

3.1.2 국부 빙압력 실측자료

(1) *Hull Damage Statistics at Baltic Sea*

Johansson은 1962~63년, 1965~66년 겨울철 발틱해를 운항하는 200여척의 선박에 대해 빙하중에 의해 선체 구조부재 및 늑골, 외판에 소성 영구변형이 발생한 선체 손상(hull damage) 정도를 조사하였다. Johansson은 선체의 손상정도로부터 선체에 가해진 최대 빙압력의 크기를 계산하고 이를 Fig. 3-41과 같이 선박의 배수량과 엔진출력의 함수로 나타내었다. Fig. 3-41은 FMA/SMA Ice class 1A에 해당하는 선박의 선수부에서의 손상 유무를 나타내고 있다.

Johansson은 얼음과의 충돌 시 선박에 작용하는 빙압력은 배수량이 크고 엔진출력이 높을수록 크게 작용할 것이라고 가정하여 배수량과 엔진출력의 관계로부터 설계 빙압력을 $p = f(\sqrt{\Delta P_s})$ 로 나타내었다. 여기서 Δ (tons)는 선박의 겨울철 만재흘수선에 해당하는 최대 배수량이고 P_s (shp)는 선박에 장착된 엔진의 최대 출력을 나타낸다.

Fig. 3-41에서 검은색 점은 선체에 손상이 발생한 것을 나타내며, 흰색 점은 선체에 손상이 발생하지 않은 것을 의미한다. 이로부터 설계 빙압력은 선체에 손상이 발생한 자료는 모두 포함시키도록 정의하였다. Fig. 3-42에서도 1A Super, IB, IC 등 다른 등급의 선박이나, 선체 중앙부, 선미부에 대한 데이터도 같은 방식으로 나타내었다.

이처럼 빙하중을 간접적으로 추정하는 Johansson의 방법은 FMA/SMA 규정의 기초가 되었다. 그리고 FMA/SMA 규정(1971)에서는 Fig. 3-41에서 실선으로 표시된 선처럼 Johansson의 방법을 적용하되 그 수준보다는 약 절반 정도 작은 값을 설계 빙압력으로 제시하였다 (Fig. 3-41에서 점선으로 표시). 또한 Johansson은 설계 빙압력이 해빙의 압축 파괴강도를 넘을 수 없다고 보고 3MPa를 해빙의 압축강도 상한으로 생각하였는데, 이는 발틱해의 빙상조건에 대한 것으로서 빙상조건이 보다 열악한 캐나다 북극해의 다년생빙에는 적용할 수 없다.

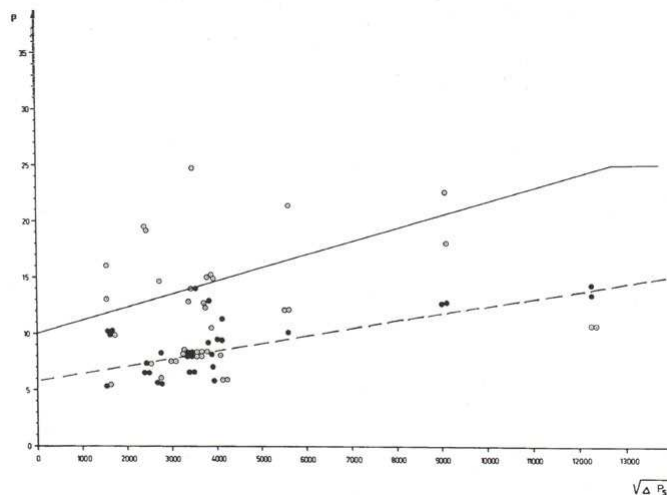


Fig. 3-41 The strength of ships of ice class 1A in the bow region. The black spots indicate that the ship has ice-damage in this region. The white spots indicate that no damage has occurred. The solid line is the design pressure proposed by Johansson(1967). The broken line is the design line adopted in FMA/SMA Rules (strength p in kp/cm^2 , Δ in tons, P_s in shp).

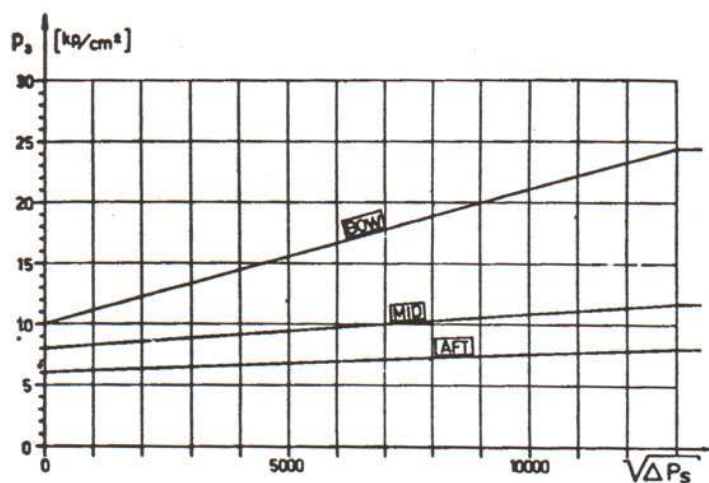


Fig. 3-42 Design ice pressure curves for the framing of ice class 1A proposed by Johansson(1967)

(2) Canadian Coast Guard Icebreaker "Canmar Kigoriak"

Arctic tanker 설계를 위한 연구가 진행되는 가운데 1972년 도입된 캐나다 빙해역 선급규정인 Canadian Arctic Shipping Pollution Prevention Regulations(CASPPR)는 Baltic해의 규정을 근간으로 했기 때문에 다년생빙보다 1년생빙의 빙상환경을 기준으로 제정되었다. 그래서 다년생빙에 대한 새로운 규정의 필요성이 대두되어 Canmar사는 북극해 연중 운항을 위한 선박의 건조를 위해 빙해역 실선시험을 통한 빙하중 자료 확보와 수치 모델링 해석을 실시하였다.

이러한 관점으로부터 캐나다 정부는 Canmar Kigoriak호를 이용해 실선시험을 수행하게 되었으며 다년생빙과 큰 빙산, 빙맥과의 충격쇄빙을 주로 다루었다. Table 3-11에 8월과 10월 시험운항에 대해 정리하였다.

Table 3-11 Comparison between August and October test conditions

<i>Parameter</i>		<i>August</i>	<i>October</i>
<i>Velocity (m/s)</i>	Range	1.3 ~ 7.2	0.5 ~ 4.2
	Mean	4.9	2.0
<i>Ice Thickness (m)</i>	Range	12.0 ~ 30.0	5.0 ~ 12.0
	Mean	15.0	6.0
<i>Ice Surface Temperature (°C)</i>	Range	0 ~ -1	-1 ~ -3
	Mean	-0.5	-2.5
<i>Uniaxial Strength (MPa)</i>	Range	1.8 ~ 3.7	3.0 ~ 7.4
	Mean	2.9	4.3

NOTE: The uniaxial compress strength was measured in the vertical direction.

Canmar Kigoriak호는 1981년 8월과 10월 2차례에 걸쳐 Beaufort해에서 실선시험이 수행되었다 (Varsta, 1983; Ghoneim and Keinonen, 1983). 8월 시험은 매우 두꺼운 1년생빙과 2년생빙에서 실시되었지만 얼음은 상대적으로 덜 차갑고, 덜 단단하였다. 10월 시험은 두꺼운 다년생빙에서 실시되었는데, 8월 시험에 비해 비교적 차갑고 단단한 상태의 얼음에서 수행되어 충돌속도와 측정된 국부 빙압력은 8월 시험 항해보다 높은 값을 나타내었다. 국부 빙압력은 Kigoriak호 선수부의 보강재(stiffener)와 웨브(web)에 설치된 strain gauge를 통해 측정하였다. Fig. 3-43에 접촉면적에 따른 국부 빙압력을 정리하였다.

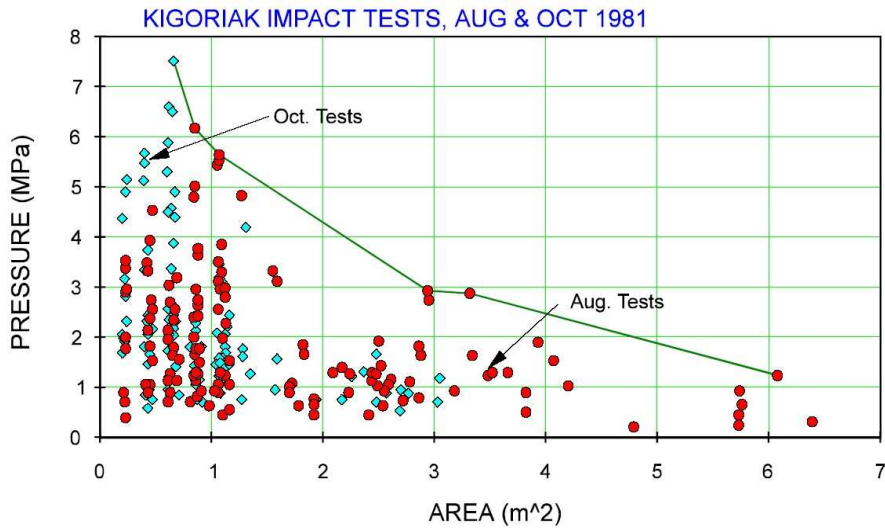


Fig. 3-43 Local ice pressure vs. contact area for Canmar Kigoriak in linear scale (Daley, 1994)

Fig. 3-43에서 보면 Kigoriak호의 10월 실선시험의 경우 작은 접촉면적에서 높은 국부 빙압력이 발생함을 알 수 있는데, 이는 높은 빙강도(ice strength)에 의한 영향이다. 반면 8월 실선시험은 접촉면적이 큰 부분에서도 국부 빙압력이 발생하는데, 이는 충돌하중이 컸기 때문에 발생했다. 또한 실선은 8월과 10월 빙압력의 최대값들을 연결한 선이다.

Canmar Kigoriak호의 자료를 보면 국부 빙압력은 충돌속도에 의존하지 않으며, 국부 빙압력의 최대값은 해빙의 1축 압축강도 σ_c 보다 2~5배 정도 큰 경우가 많다. 선박의 설계 시 얼음과 접촉면적의 차이에 따른 국부 빙압력의 차이는 중요한 설계 변수가 되는데, Johansson et al.(1981)은 panel의 작용하는 국부 빙압력과 접촉면적의 관계를 Arctic class 10 선박의 설계에 제안하였다. Johansson et al.은 국부 빙압력이 접촉면적의 함수로서 면적이 증가하면 얼음과 구조물 접촉 부위에서의 불균일(non-uniform)하고 비동시적(non-simultaneous)인 파괴가 일어나기 때문에 국부 빙압력이 작아진다고 판단했다. Fig. 3-44에는 국부 빙압력과 접촉면적의 관계를 정리하였다. 여기서 panel에 작용하는 8.5MPa의 국부 빙압력은 Johansson et al.이 추정된 것이다. 그림에서 국부 빙압력은 접촉면적이 $6.4m^2$ 까지 측정되며, 실선시험에 의해 측정된 국부 빙압력은 Arctic class 10 선박에 대해 Johansson et al.이 제안한 것보다 작음을 알 수 있다.

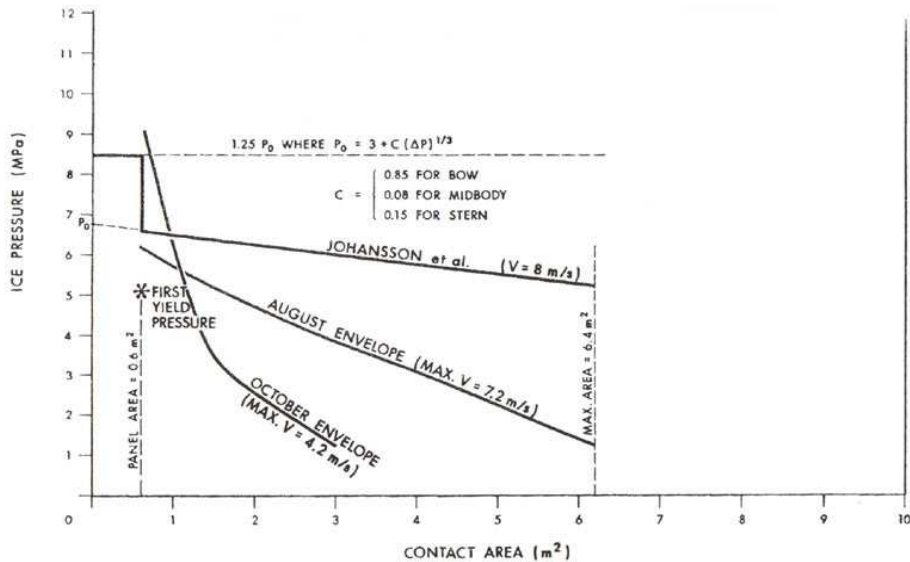


Fig. 3-44 Comparison of predicted and measured ice pressures as a function of contact area (Ghoneim and Keinonen, 1983)

Canmar Kigoriak호의 실선시험을 통해 얻어진 결론은 그간 CASPPR에서 최대 국부 빙압력값으로 사용해 오던 10.34MPa 대신 2배 정도 큰 값인 20MPa를 선박의 크기에 관계없이 적용해야 하며, 선수부는 빙하중을 견딜 수 있도록 충분히 보장되어야 한다는 것이었다. 이러한 결론은 전체 빙하중에 대한 보완된 내용과 함께 CASPPR 규정(1996)에 새롭게 적용되었다.

(3) Finnish Icebreaker "Sisu"

발틱해용 쇄빙선박의 구조설계는 핀란드-스웨덴 규정을 근간으로 삼았다. 핀란드 쇄빙선 Sisu호는 선체에 설치된 계측장비를 통해 1982년 3월 Bothnia만의 시험 운항에서 전체 빙하중과 국부 빙압력을 측정하였다. Sisu호의 선수부 측면 외판에는 4개의 빙압력 측정 gauge와 26개의 strain gauge가 설치되어있어 이를 통해 전체 빙하중과 국부 빙압력, 선박의 속도가 함께 자동으로 계측된다 (Riska et al., 1983). 측정 당시 평탄빙 두께는 0.6~0.8m이고, 선속은 11knots(5.65m/s)였다. 하지만 여기서 측정된 자료는 입수하지 못했다. Sisu호의 제원은 Table 3-12와 같다.

Table 3-12 Dimension of the Sisu

선박 제원	길이 (Length)	L_{pp} (m)	96
	폭 (Moulded Breadth)	B (m)	23.5
	흘수 (Draft)	d (m)	8.3

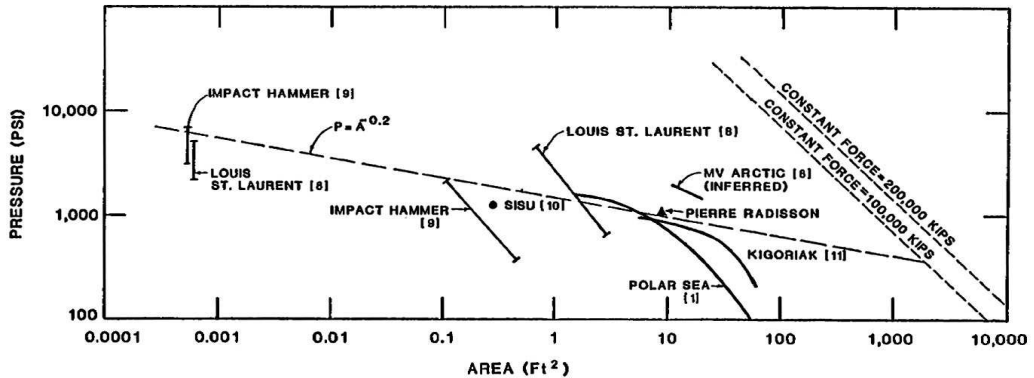


Fig. 3-45 Local ice pressure vs. contact area for Finnish icebreaker Sisu and some example design curves (SNAME SSC Report No.340, 1990)

(4) U.S. Coast Guard Icebreakers "Polar Sea", "Polar Star"

1982년 9월과 10월 여름철 Beaufort해의 다년생빙에서 그리고 1983년 3월과 4월 겨울철 Chukchi해의 1년생빙, 다년생빙에서 Polar class 쇄빙선을 이용한 시험항해를 실시하였다. 여기서 선수부 횡늑골(transverse frame)의 panel에 부착된 strain gauge를 통해 빙압력을 측정하였다. panel은 60개의 sub-panel로 구성되어 있으며, 충돌 이벤트가 발생하는 동안 빙압력이 계산된다. 1982년 여름철 시험항해에서는 총 112개의 충돌 이벤트가 기록되었는데, Fig. 3-46에 선박의 충돌속도에 대한 최대 빙압력을 나타내었다. 여기서 속도가 3.5knots(1.8m/s)까지는 속도가 증가하면 빙압력도 함께 커지는데 이때 대부분은 두꺼운 다년생빙과 충돌하는 경우이다. 또한 충돌속도가 빠른 부분에서 발생한 빙압력은 비교적 얇은 빙판에서의 운항이거나 다년생 유빙과의 충돌에 의한 경우다.

Fig. 3-47에는 1984년 여름철 Beaufort해에서 실선시험을 통해 계측된 빙압력을 충돌 속도에 대해 정리하였다. 여기서 빙압력은 충돌속도의 전 구간에 걸쳐 분포하며, 이를

통해 선박의 충돌속도와 빙압력은 서로 큰 연관성이 없음을 알 수 있다. Fig. 3-48에는 시험항해 구간에 따른 얼음의 상태 및 선박의 충돌속도에 따른 충돌 이벤트를 정리하여 나타내었다.

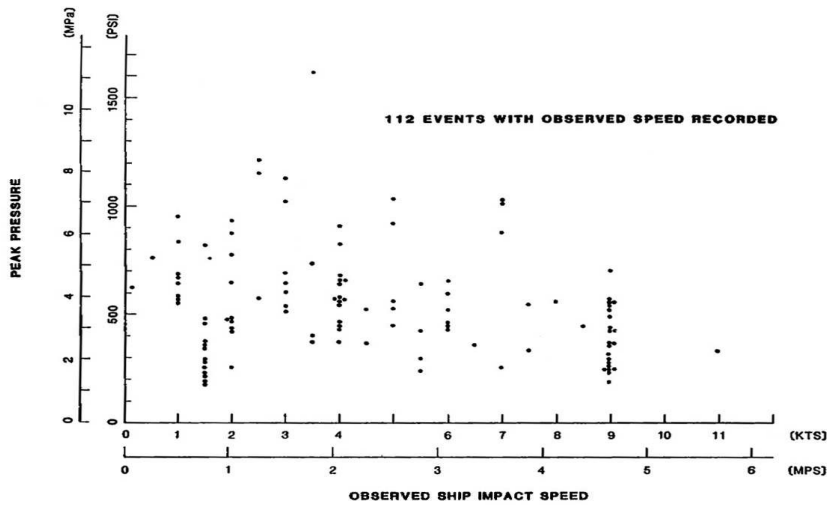


Fig. 3-46 Highest average pressure on a single sub-panel vs. impact speed for the 1982 summer Beaufort Sea data (SNAME SSC Report No.329, 1990)

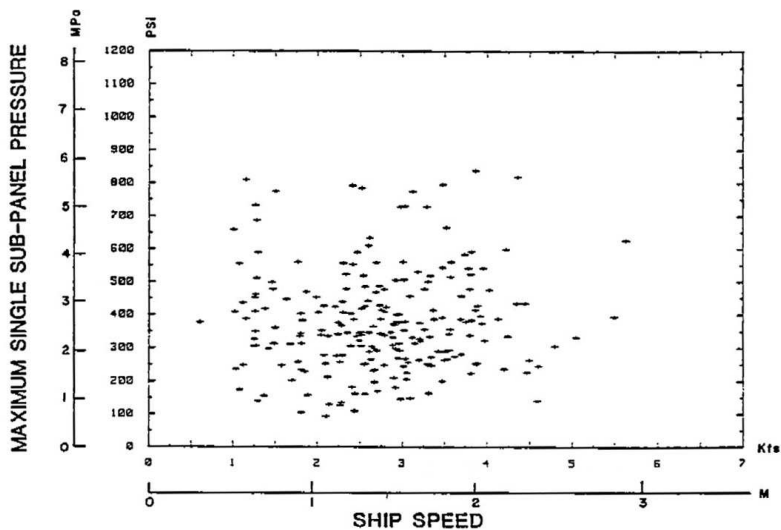


Fig. 3-47 Highest average pressure on a one sub-panel vs. Ship speed for the 1984 summer Beaufort Sea data (SNAME SSC Report No.339, 1990)

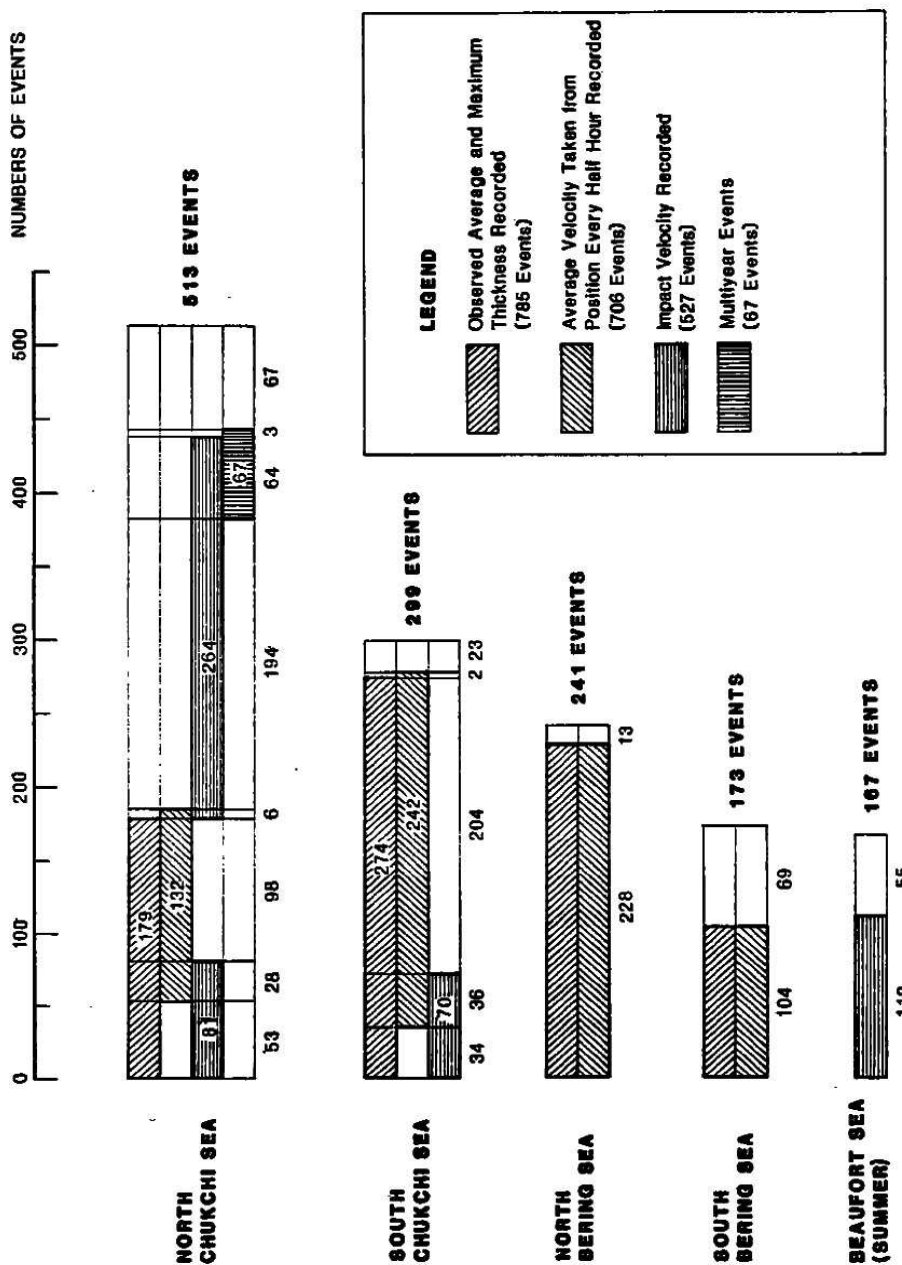


Fig. 3-48 Summary of all data showing the number of events and the type of data in each geographical area (SNAME SSC Report No.329, 1990)

Polar Sea 쇄빙선은 빙하중 계측을 위해 선수부 경사늑골(cant frame)에 80개의 strain gauge를 부착하였으며, 이 중 60개의 strain gauge 채널에서 충돌 이벤트 시 선체의 압축변형을 측정하였다. Fig. 3-49는 1983년 4월 Chukchi해에서 Polar Sea 쇄빙선을 이용한 시험항해에서 계측된 빙압력 데이터를 나타낸 것이다. Fig. 3-49에서 빨간색 사각형으로 표시된 점은 전체 접촉면적에 대한 평균 빙압력을 나타낸다. 최대 빙압력은 접촉면적이 작은 곳에서 발생하는데, "Peak Meas."로 표시된 선은 그러한 면적에서 측정된 최대 빙압력을 나타낸다 (Daley, 1994).

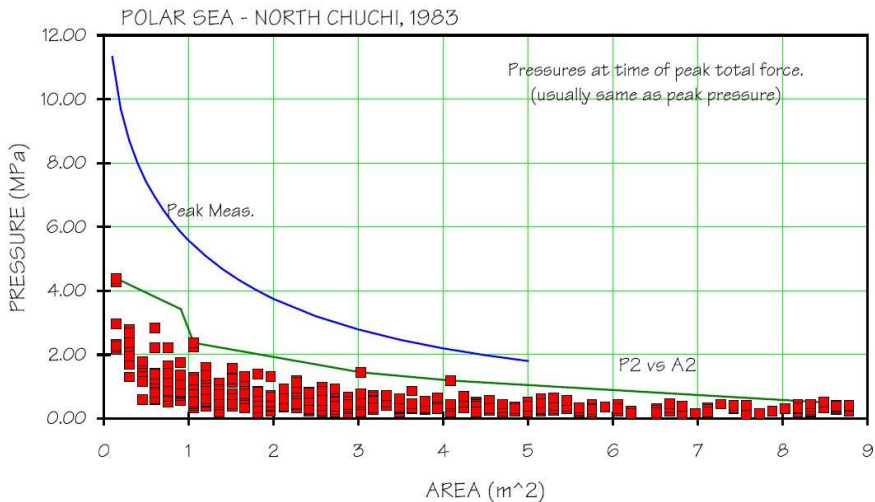


Fig. 3-49 Measured ice pressure vs. contact area from 1983 winter Polar Sea data (Daley, 1994)

Fig. 3-50은 Polar Sea 쇄빙선의 여름철과 겨울철에 측정된 빙압력과 함께 다른 선박에 대한 빙압력 데이터들의 최대 포락선(extreme envelope)을 비교한 것이다. Fig. 3-50에서 특이한 점은 MV Arctic호를 제외한 다른 선박의 경우를 살펴보면 선박의 크기가 클수록 측정된 빙하중과 빙압력이 작게 측정되었다는 점이다. 하지만 이는 시험항해 시의 빙상조건과 실험조건이 각기 달랐기 때문으로 판단된다. 예를 들면 규모가 작은 Kigoriak호의 경우 충돌 이벤트는 두꺼운 다년생빙에서 실시되어 큰 빙압력이 발생하였지만, 규모가 큰 Manhattan호의 경우 여름철 비교적 덜 단단한 상태의 빙판에서 실선시험이 수행되었기 때문에 Kigoriak호에서 측정된 빙압력보다 작게 측정된 것으로 여겨진다. 그러므로 선박에 작용하는 최대 빙압력은 선박의 크기와는 크게 상관없고 빙상조건과 접촉면적이 보다 중요하다는 것을 알 수 있다.

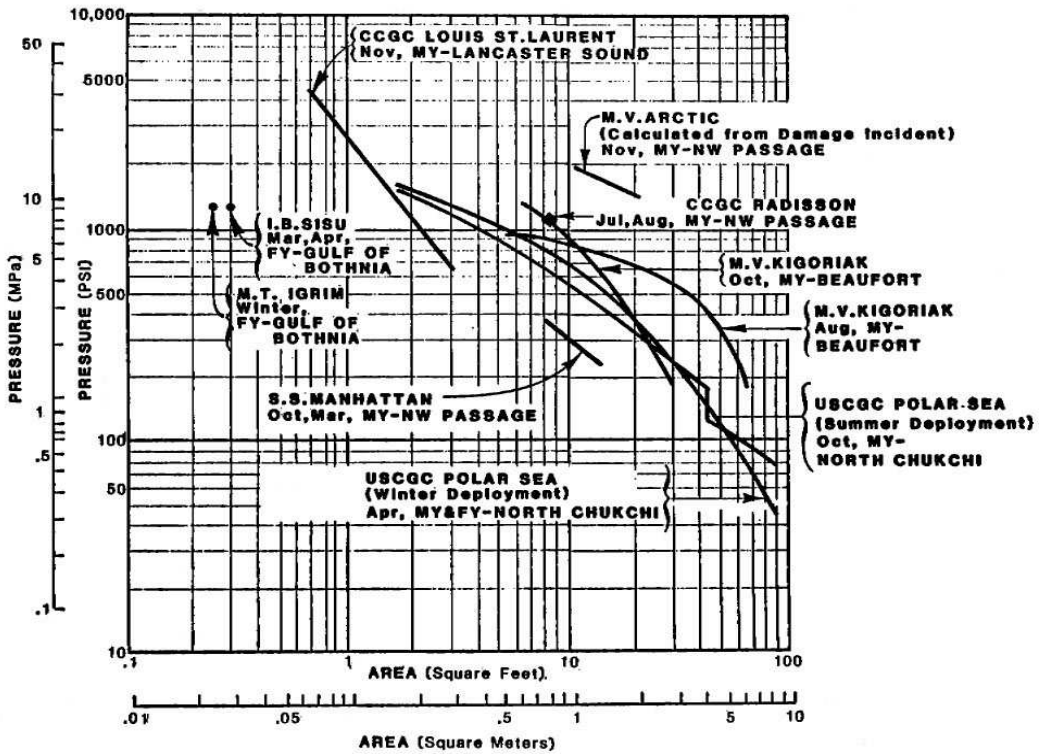


Fig. 3-50 Comparison of the extreme envelopes of various measured data during 1983 winter Polar Sea trials (SNAME SSC Report No.329, 1990)

Fig. 3-51은 Polar Sea 쇄빙선의 실선시험을 통해 얻어진 최대 포락선과 여러 빙해역 선급에서 제시한 설계 빙압력 곡선과 비교한 것이다. CASPPR 규정과 러시아 규정 그리고 시험운항을 통해 측정된 빙압력 데이터들 경우 접촉면적이 작은 부분에 대해서는 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 하지만 접촉면적이 큰 부분에 대해선 선급 규정에 언급되어 있지 않기 때문에 이 부분에 대한 직접적인 비교는 어렵다.

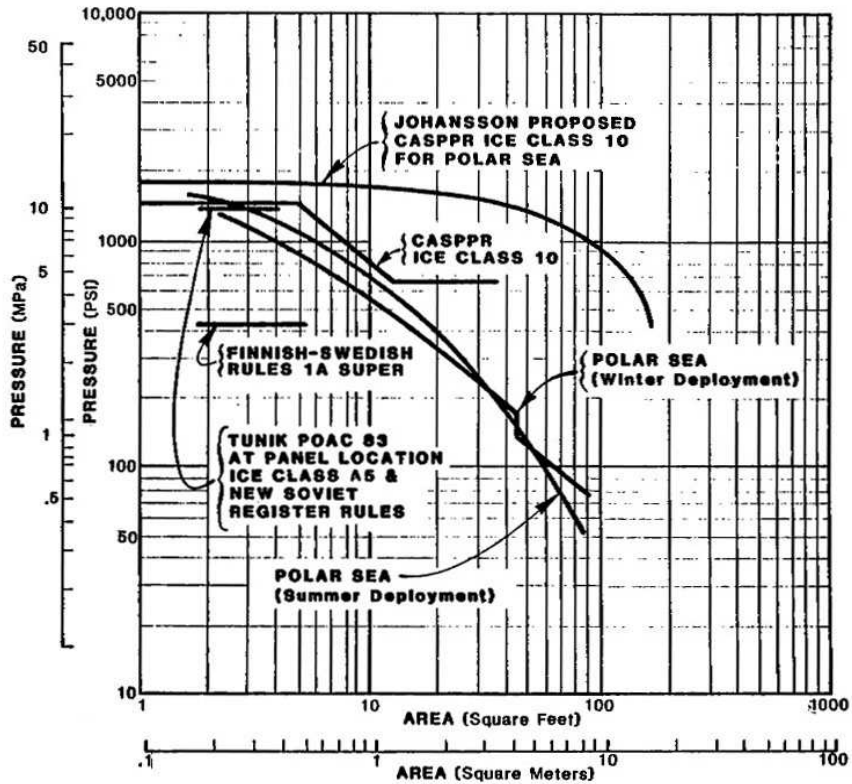


Fig. 3-51 Comparison of ice class regulations design pressures with 1983 winter Polar Sea measured data (SNAME SSC Report No.329, 1990)

Polar Sea 쇄빙선은 1982~84년 Beaufort해 운항과 1984년 남극해 항해를 실시하였다. 1982년 Beaufort해 시험항해는 빙상환경이 매우 혹독한 두꺼운 다년생빙에서 실시되어 최고 11.1MPa의 빙압력이 계측된 반면, 1984년에는 작은 규모의 다년생 유빙과 두께 2ft(0.61m)이내의 1년생빙에서 실시되어 빙압력은 7.2MPa 정도가 측정되었다 (Fig. 3-52). 그리고 1984년 1월의 시험항해는 남극해의 여름철이라 빙상조건이 비교적 온화하여 측정된 빙압력은 4MPa 정도 내외다 (Fig. 3-53).

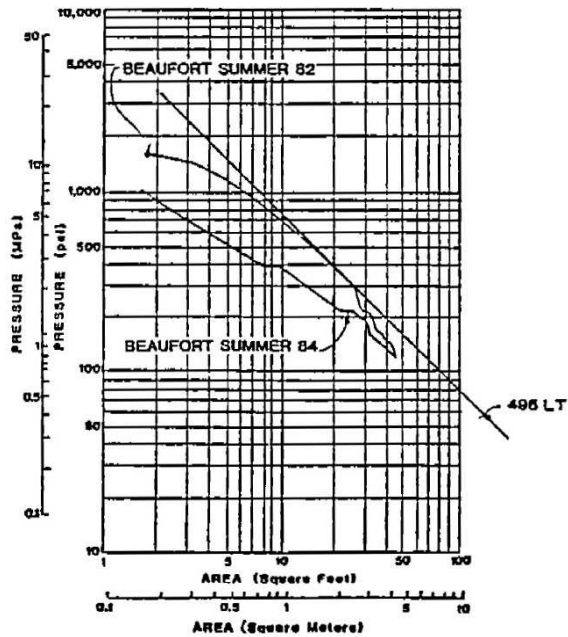


Fig. 3-52 Highest average pressure from 1982 and 1984 Beaufort Sea data vs. impact area (SNAME SSC Report No.339, 1990)

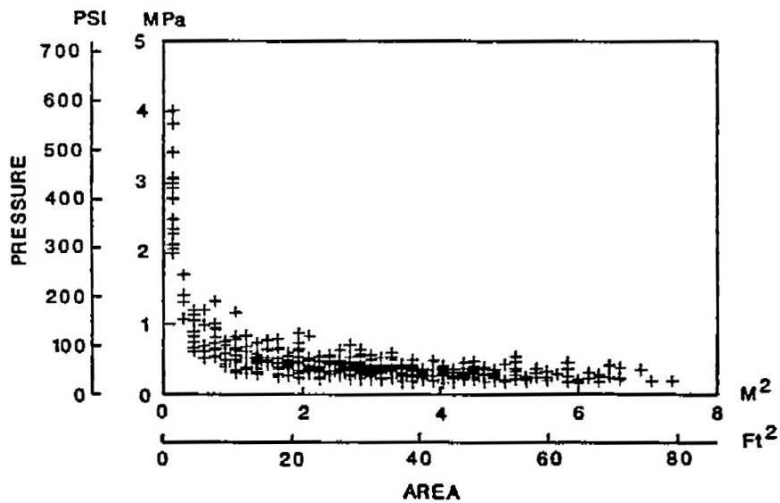


Fig. 3-53 Average pressure vs. total contact area for 1984 Antarctic summer data (SNAME SSC Report No.340, 1990)

(5) Russian SA-15 class Icebreaking Cargo Vessel

SA-15 class는 1982~87년에 걸쳐 핀란드에서 건조된 다목적 화물선으로서 북극해 항로 연중 운항과 함께 빙상상태를 파악하기 위한 목적으로 러시아 빙해역 규정에 따라 19척이 건조되었다. SA-15 class 선박의 제원은 Table 3-13과 같다.

Table 3-13 Dimension of the SA-15 class

선박 제원	길이(Length)	L_{pp} (m)	159.6
	폭(Moulded Breadth)	B (m)	24.5
	깊이(Moulded Depth)	D (m)	15.2
	흘수(Draft)	d (m)	9.0
	배수량(Displacement)	Δ (tons)	25,900
선박 성능	기관출력(Engine Power)	(shp/MW)	21,000/15.4
빙등급	Ice class	Russia ULA 1m@2knots	

SA-15 class의 선체는 2중선각 구조로서 제 2갑판까지는 횡늑골(transverse frame), 제 2갑판에서부터 상갑판까지는 종늑골(longitudinal frame)구조로 되어있다. 그리고 늑골 간격은 0.8m로 특설늑골(web frame)은 매 4~5늑골(3.2~4.0m)마다 배치하였다. 선체 대부분은 E32에 해당하는 강재를 사용하였으며, 항복응력은 315MPa정도이고 바닥부는 항복응력이 235MPa인 탄소강을 이용하였다. 1985년부터 건조된 SA-15 Super에서는 초기 SA-15 class 선박에서 발생한 선체 손상을 줄이기 위해 선수부 및 선체 중앙부, 선미 바닥부의 외판을 좀 더 두껍게 하여 구조를 강화시켰다.

1983년 5월 Franz Jose Land 근처에서 SA-15 class의 3번째 선박인 Igarka호를 이용해 북극해 항로를 따라 무르만스크(Murmansk)에서 베링해협(Bering Strait)까지의 시험운항에서 선수부에 strain gauge를 설치하여 빙압력을 계측하였다 (Fig. 3-54 참조). 여기서 20cm의 적설층을 가진 1m 두께의 평탄빙에서는 1knots(0.51m/s)의 속도로 연속쇄빙하였고 동일한 적설층을 가진 0.8m 두께의 평탄빙에서는 3knots(1.54m/s)의 속도로 운항하였다.

Igarka호의 경우 두께 0.7~0.9m 정도의 빙판을 통과하면서 7개의 충돌 이벤트가 기록되었는데, 여기서 측정된 빙압력의 분포는 대략 1.5~3.0MPa정도였고 접촉면적은

0.12~0.17m² 정도였다 (Table 3-14).

Table 3-14 Ice pressure vs. contact area for SA-15 class cargo vessels

Contact Area(m ²)	Ice Pressure (MPa)	Data Sources	Contact Area(m ²)	Ice Pressure (MPa)	Data Sources
0.168	1.54	1983 Data Tsoy et al. (1998)	0.112	6.27	1983 Data Tsoy et al. (1998)
0.16	2.9		0.131	5.29	
0.136	2.43		0.156	4.48	
0.144	2.92		0.193	3.62	
0.148	2.9		0.241	2.99	
0.144	2.2		0.287	2.69	
0.12	3		0.347	2.45	
0.0711	11		0.409	2.27	
0.0763	10		0.475	2.22	
0.0823	9.03		0.548	2.17	

Kapitan Danilkin호도 선수부에 strain gauge를 설치하여 1987년 북극해와 노르웨이 사이의 시험운항을 통해 빙압력을 측정하였는데, 이때 얼음의 두께는 4~5m정도였고 얼음의 집적도는 9/10~10/10정도였다. 선박의 충돌속도는 2.0~7.5knots(1.02~3.86m/s)였는데, 6knots(3.01m/s)까지 측정된 응력은 선체 외판의 항복강도에서 30%를 초과하지 않았다. Fig. 3-55와 Fig.3-56에는 Kapitan Danilkin호의 충돌 이벤트에서 계측된 빙압력이 나타나있다 (Table 3-14).

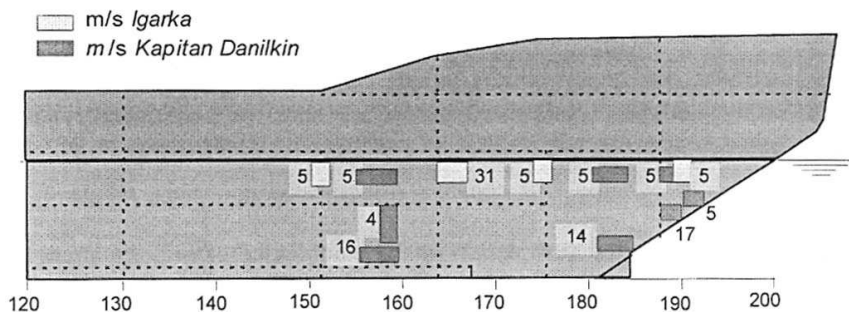


Fig. 3-54 Location of strain gauges in the forebody of Igarka and Kapitan Danilkin (Tsoy et al. 1998)

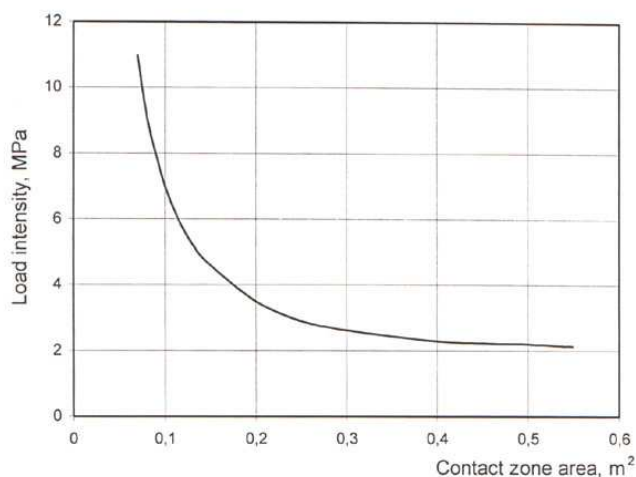


Fig. 3-55 Local ice pressure vs. contact area at a speed of 3-4m/s for SA-15 class ships (Tsoy et al. 1998)

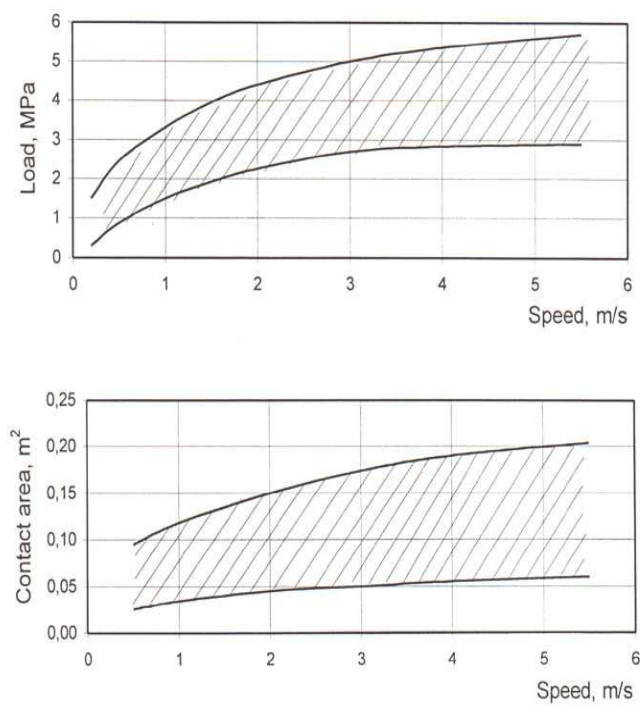


Fig. 3-56 Influence of ship's speed upon ice pressure and contact area (Tsoy et al. 1998)

(6) Canadian OBO Carrier "MV Arctic"

MV Arctic호는 OBO 채빙상선으로 1984년 6월 Baffin만 북쪽 Coburg섬 근처에서의 시험운항을 통해 다년생빙에서 142개의 선수부에 작용하는 빙하중을 측정하였다. 충돌 이벤트 동안 빙압력과 접촉면적이 계산되었는데, 이는 Kigoriakh호와 Polar Sea처럼 선박의 특정부위에 작용하는 빙압력을 계측한 것은 아니다.

MV Arctic호의 선수 형상은 썰기 형태로 얼음과의 접촉면은 대칭형태의 삼각형 모양이다. 충돌 이벤트 동안 얼음이 선수부에 의해 crushing될 때보다 선수부가 sliding할 경우 접촉면적이 최대값에 도달하게 되는데, 얼음을 관입한 면적으로부터 계산된 접촉면적을 통해 각 충돌 이벤트 동안 빙압력과 접촉면적의 최대값을 계산하였다. Fig. 3-57과 Fig. 3-58에 MV Arctic호의 실선시험에서 얻어진 국부 빙압력과 접촉면적과의 관계가 정리되어있다. Fig. 3-58에서 실선은 접촉면적에 따른 최대 빙압력을 연결한 선이다.

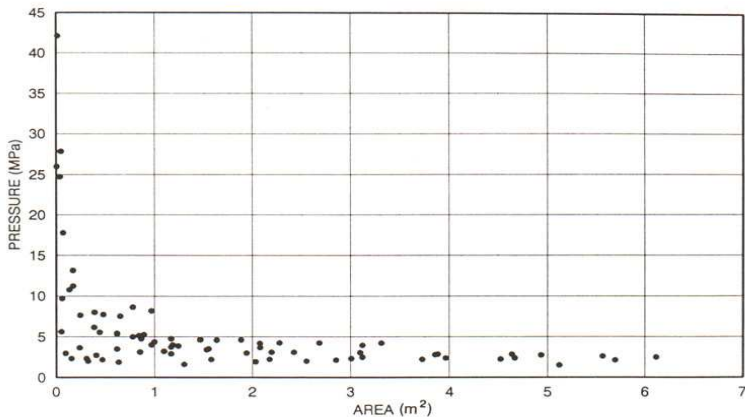


Fig. 3-57 Local ice pressure vs. contact area for 1984 MV Arctic trial (Masterson and Frederking, 1993)

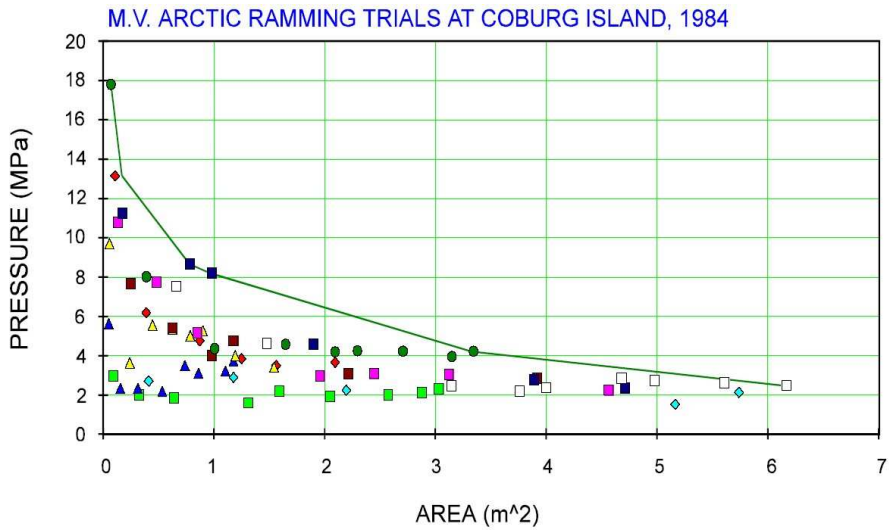


Fig. 3-58 Local ice pressure vs. contact area for 1984 MV Arctic trials (Daley, 1994)

(7) U.S. Icebreaking Research Vessel "Nathaniel B. Palmer"

Nathaniel B. Palmer호는 미국 과학재단(National Science Foundation)의 쇄빙조사선으로서 남극해 연구 및 조사를 위한 목적으로 1992년 건조된 쇄빙선이다. Nathaniel B. Palmer호의 제원은 Table 3-15와 같다.

Table 3-15 Dimension of the Nathaniel B. Palmer

선박 제원	길이(Length)	L_{pp} (m)	93.7
	폭(Moulded Breadth)	B (m)	18.3
	깊이(Moulded Depth)	D (m)	9.1
	흘수(Draft)	d (m)	6.3
	배수량(Displacement)	Δ (tons)	6,417
선박 성능	기관출력(Engine Power)	(shp/MW)	12,720/8.8
선수 형상	선수각(Stem Angle)	γ (deg)	27
	선수선형(Bow Type)	wedge-shaped bow	
빙등급	Ice class	ABS A3 0.9m@3knots	

Nathaniel B. Palmer호는 전형적인 쇄빙선의 선수 형상을 가지고 있지만 배수량은 미국의 Polar class 쇄빙선과 스웨덴 Oden호의 절반정도이다. Palmer호는 배수량에 변화에 따라 빙하중이 어떻게 작용하는지 고려하기 위해 Polar Sea 쇄빙선과 Oden호의 실측자료와 비교했으며, 내빙대(ice belt)의 각 부분에서 얼음과의 충돌 시 발생하는 빙하중을 고려하기 위해 선수부와 선수부 측면, 선수부 바닥 및 선미부에 strain gauge를 부착하여 빙하중과 빙압력을 측정하였다. Palmer호는 3주 동안 Weddell해, South Orkney섬, 남극의 South Shetland섬을 시험항해 하면서 총 796개의 충돌 이벤트를 기록하였다 (Fig. 3-59). 여기서 빙압력의 대부분은 선수부(64%)에서 측정되었고 그다음 선측부(27%), 선미부(7%), 바닥부(2%) 순으로 계측되었다

Palmer호는 59개의 strain gauge 부착위치를 유한요소 해석을 통해 결정하였다. 1992년 8월과 9월 시험항해에서 첫 번째 빙상상태는 얼음의 집적도가 9/10 내지 10/10 이며 그 중 10~20%는 2~4ft(0.6~1.2m)의 평탄빙이었고, 얼음의 평균 굽힘강도는 75 psi(515kPa)로 측정되었다. 두 번째 빙상상태는 1~2ft(0.3~0.6m)의 평탄빙이었으며, 얼음의 평균 굽힘강도는 79psi(545kPa)였다.

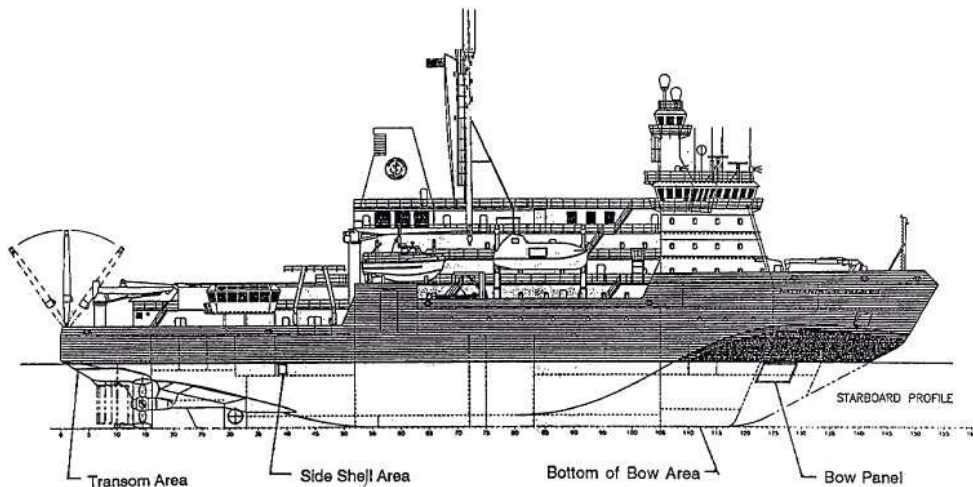


Fig. 3-59 Locations for the measurement of local ice impact loads (SNAME SSC Report No.376, 1995)

Fig. 3-60은 선체의 각 panel에 대한 최대 빙압력 포락선에 대해 평균 빙압력과 접촉면적의 관계로 나타내었다. 접촉면적이 작은 부분에서는 선수부와 선측부의 빙압력이 거의 비슷하지만 전체 접촉면적을 고려하면 국부 빙압력은 선수부에서 가장 크게 발생하며 선측부, 선미부, 바닥부 순으로 나열된다. Fig. 3-61은 single sub-panel에 대한 빙압력을 선박의 충돌속도에 대해 나타낸 것인데, 여기서 선수부에서의 최대 빙압력은 735psi(5.07MPa) 정도였다. 또한 Fig. 3-62는 모든 sub-panel에 대해 나타낸 것으로, 이때 선수부에 작용한 최대 빙하중은 236LT(2.35MN) 정도였다.

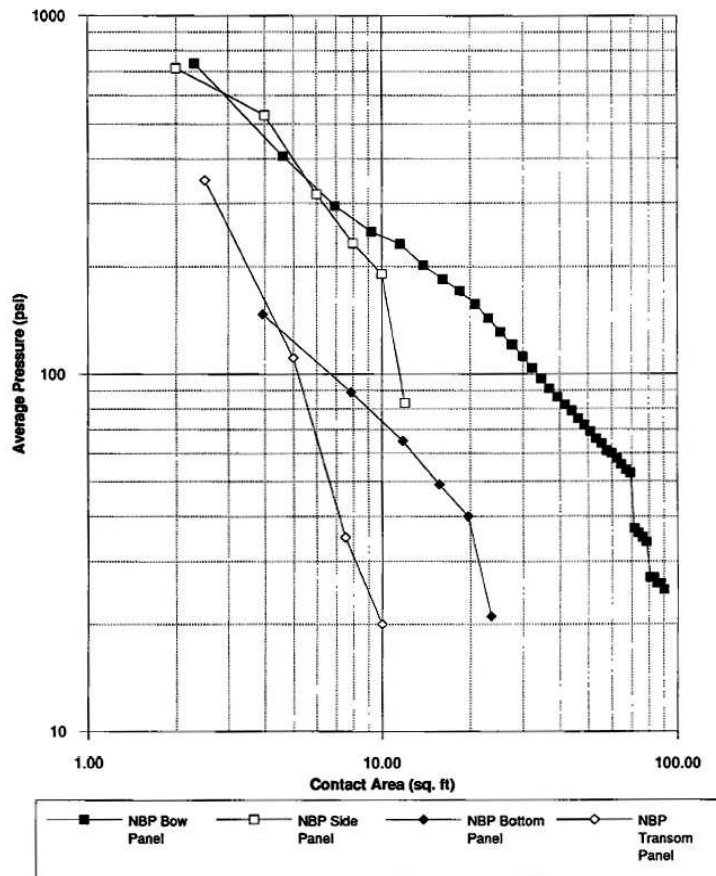


Fig. 3-60 Extreme pressure for all hull panels vs. contact area (SNAME SSC Report No.376, 1995)

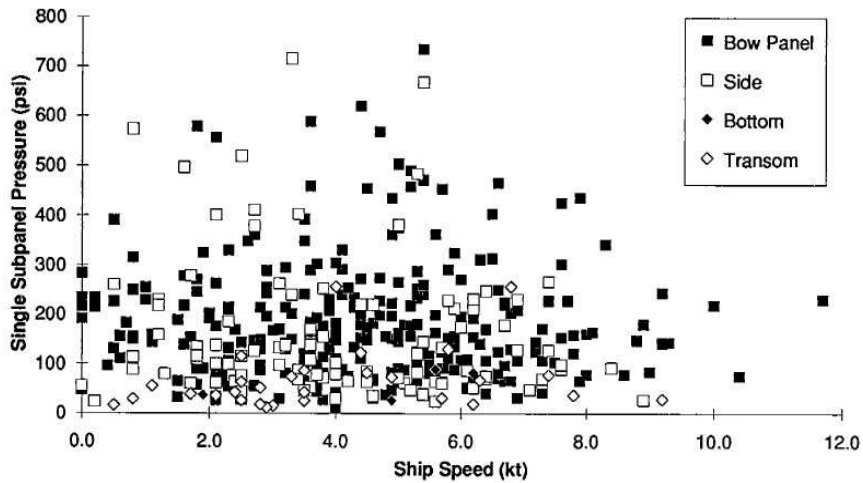


Fig. 3-61 Single sub-panel pressure vs. ship speed (SNAME SSC Report No.376, 1995)

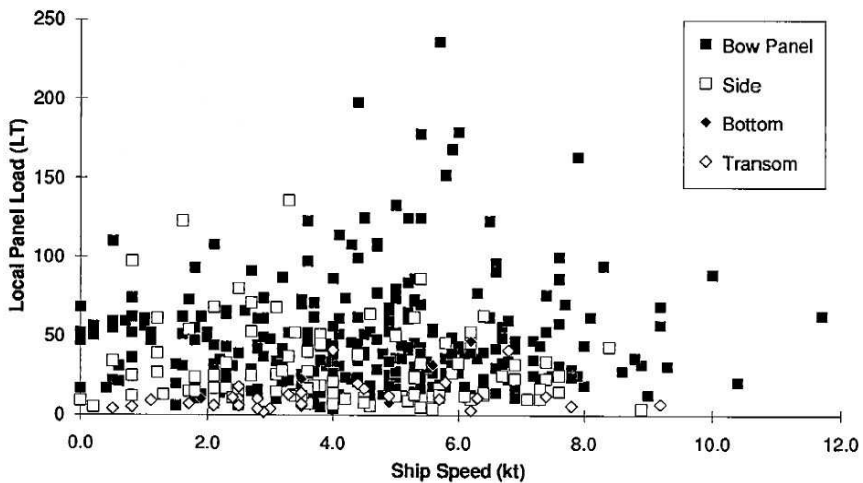


Fig. 3-62 Hull panel ice load vs. ship speed (SNAME SSC Report No.376, 1995)

Fig. 3-63은 얼음의 두께에 따라 선체 panel에 작용하는 빙압력을 정리하였다. 여기서 최대 빙압력은 얼음의 두께가 2.0~3.5ft(0.6~1.1m) 부근에서 발생하지만, 이는 빙해역의 일반적인 빙두께이므로 이 경우 최대 빙압력과 얼음의 두께는 큰 연관성이 없음을 알 수 있다.

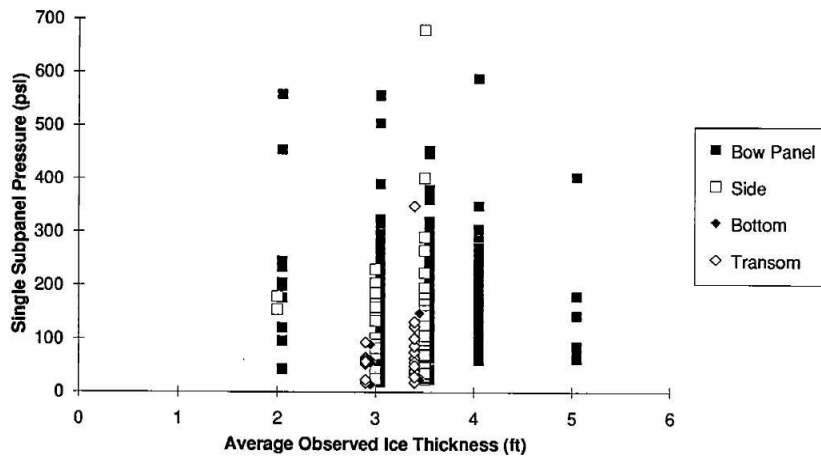


Fig. 3-63 Hull panel local load vs. average observed ice thickness (SNAME SSC Report No.376, 1995)

Palmer호 시험항해의 목적 중 하나는 배수량은 다르지만 유사한 형상을 가진 선박에 작용하는 빙압력의 크기를 비교하는 것이었다. Palmer호에 비해 배수량이 두 배 가량 큰 Polar Sea 쇄빙선의 계측패널에서 측정된 선수부 최대 빙압력이 Fig. 3-64에 함께 표시되어 있다. Polar Sea 쇄빙선의 계측패널의 넓이(0.15m^2)와 Palmer호의 계측패널 넓이(0.21m^2)의 차이를 감안할 때 두 선박에서 계측된 최대 빙압력의 자료가 비교적 잘 일치하고 있음을 보여준다.

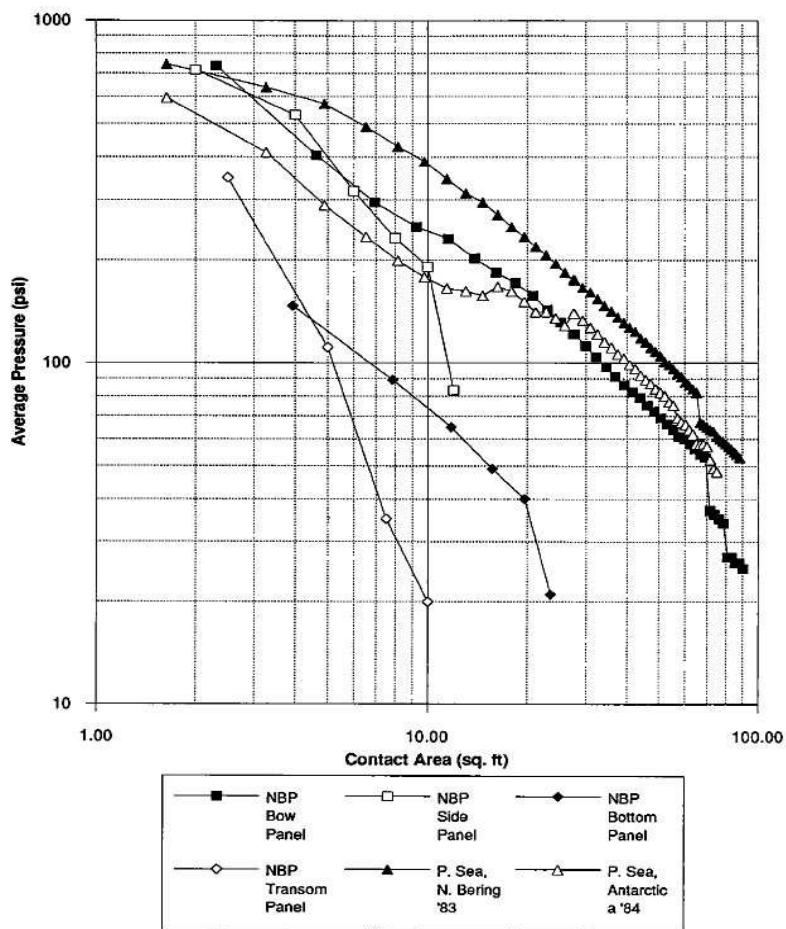


Fig. 3-64 Comparison of extreme pressure vs. contact area for Polar Sea and Nathaniel B. Palmer (SNAME SSC Report No.376, 1995)

3.1.3 빙하중 실측자료 분석

(1) 전체 빙하중 (Global Ice Load)

본 장에서는 3.1.1절에서 자세히 설명한 전체 빙하중 실측자료를 분석하였다. 수집된 전체 빙하중은 각기 다른 빙상조건과 운항조건에서 측정된 자료이며, 선종과 계측 방법 또한 달라 이를 통한 전체 빙하중의 직접적인 비교는 어렵다고 판단된다. 하지만 수집된 전체 빙하중 자료로부터 선박과 얼음의 충돌 시 발생하는 전체 빙하중의 전반적인 흐름을 이해하는 데에는 많이 도움이 된다고 생각한다.

빙해역 운항 시 선박에 작용하는 전체 빙하중은 얼음의 두께와 강도, 얼음의 크기, 온도 등과 같은 빙상환경과 관련된 요소와 더불어 선박과 얼음의 충돌속도, 선박의 크기와 선수선형 등과 같은 선박의 형상과 관련된 요소를 통해 결정된다. 빙해역에서 선박은 연속쇄빙(continuous icebreaking) 또는 충격쇄빙(ramming) 통해 진행하는데 운항 방식에 따라 빙하중을 결정하는 요인이 다를 수 있다. 연속쇄빙의 경우는 얼음의 두께 및 얼음의 굽힘강도, 압축강도 등이 중요한 요소가 될 수 있으며, 충격쇄빙의 경우 선박의 속도와 선수 형상, 선박의 크기가 빙하중을 결정하는데 있어 보다 중요한 요인이 된다. 그리고 충격쇄빙 중 빙판이 깨어지지 않는 경우 극한 빙하중(extreme ice load)이 발생한다.

수집된 전체 빙하중은 실선 시험을 통해 계측된 값으로서 대부분의 경우 선박이 큰 손상을 받을 정도의 강한 충격에서 측정된 극한 빙하중이기 보단 정상적인 운항 상태에서 계측된 자료로 보는 것이 적당하며, 이를 바탕으로 선박의 전체 빙하중을 분석하였다.

우선 전체 빙하중을 선박의 속도에 대한 함수로 정리하였고, 시험 운항을 실시한 여섯 척의 선박에 대한 전체 빙하중 자료를 동일한 척도(scale)와 단위(unit)로 표시하였다.

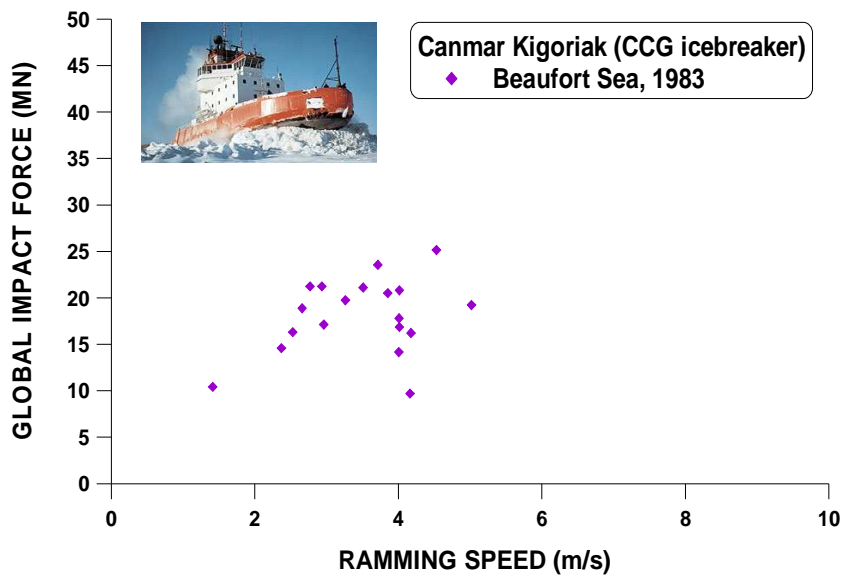


Fig. 3-65 Global ice loads vs. ship speed for Canmar Kigoriak

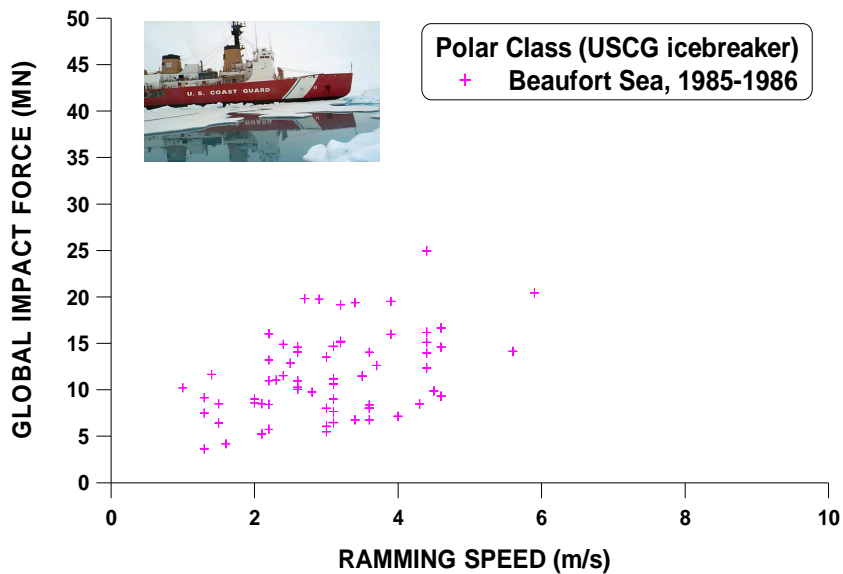


Fig. 3-66 Global ice loads vs. ship speed for Polar class icebreakers

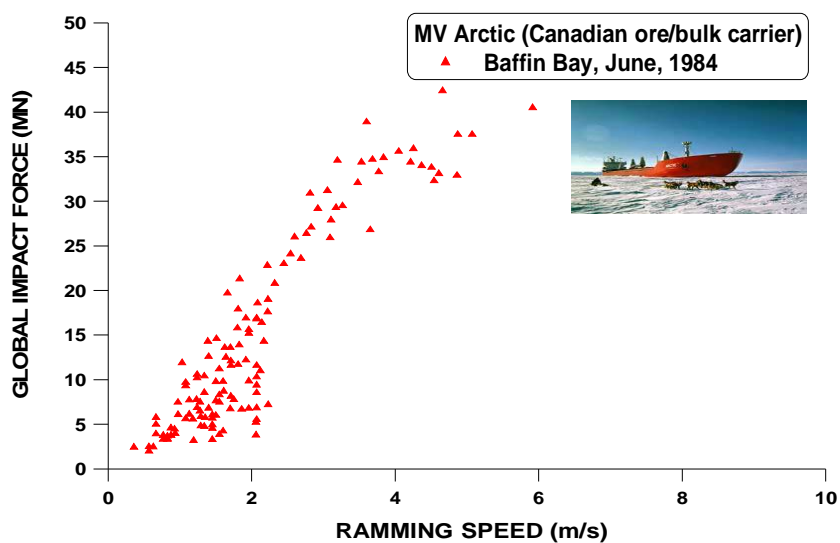


Fig. 3-67 Global ice loads vs. ship speed for MV Arctic

- 단 *MV Arctic*호의 경우 선박의 속도가 $2.4 \sim 6 \text{ m/s}$ 인 구간의 전체 빙하중은 *Arctec Canada Ltd.(ACL)*에서 실시한 모형실험 결과를 실선으로 확장한 추정값이다.

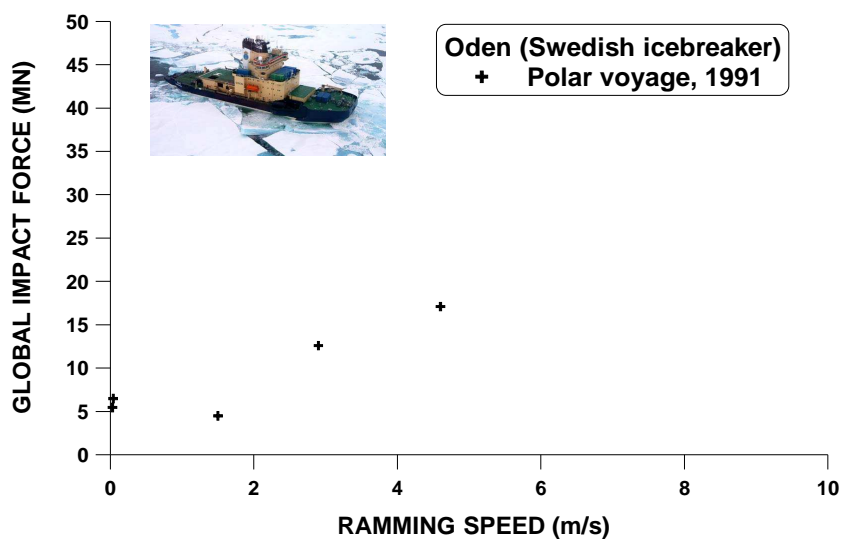


Fig. 3-68 Global ice loads vs. ship speed for Swedish icebreaker Oden

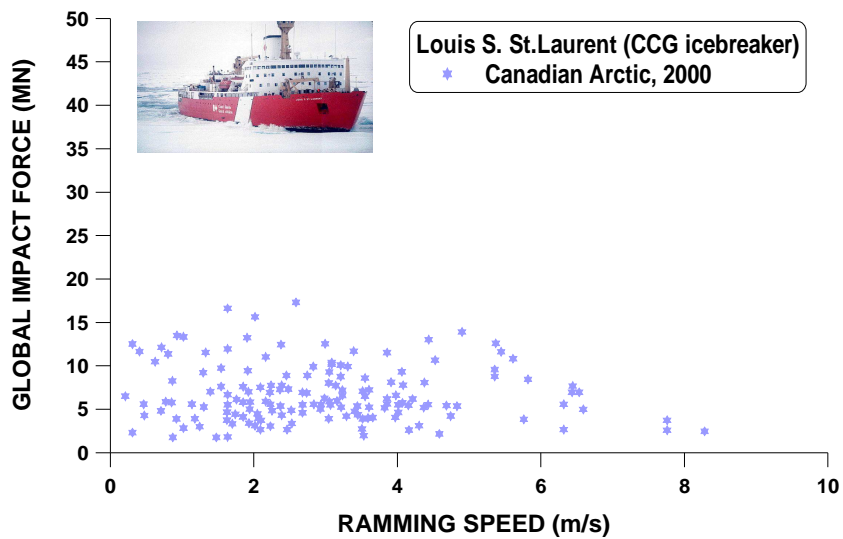


Fig. 3-69 Global ice loads vs. ship speed for icebreaker Louis S. St. Laurent

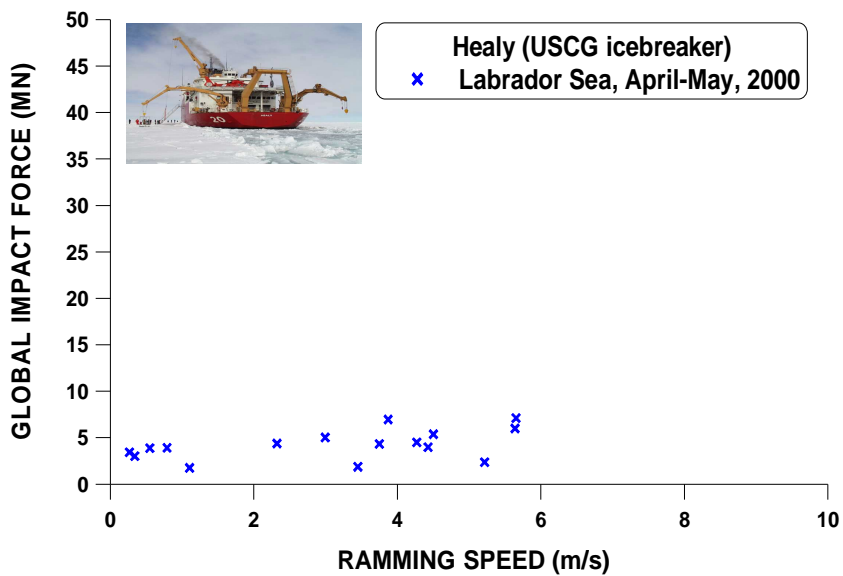


Fig. 3-70 Global ice loads vs. ship speed for icebreaker Healy

Fig. 3-71은 여섯 척의 쇄빙선박에서 계측된 전체 빙하중과 충돌속도를 하나의 그래프에 모두 나타낸 것이다. 여기서 주목할 점은 선박의 충돌속도가 증가하면 대부분의 전체 빙하중도 증가하는 경향을 가진다는 것이며, 이를 통해 전체 빙하중과 충돌속도의 연관성을 확인 할 수 있다. 다만 St. Laurent호와 Healy호의 경우 전체 빙하중은 충돌속도의 전 구간에 걸쳐 분포하지만 이는 다양한 빙상환경에서 계측된 자료이며, 이중 2년생빙과 다년생빙의 경우 선박의 충돌속도가 증가하면 선박에 작용하는 전체 빙하중도 증가함을 알 수 있었다.

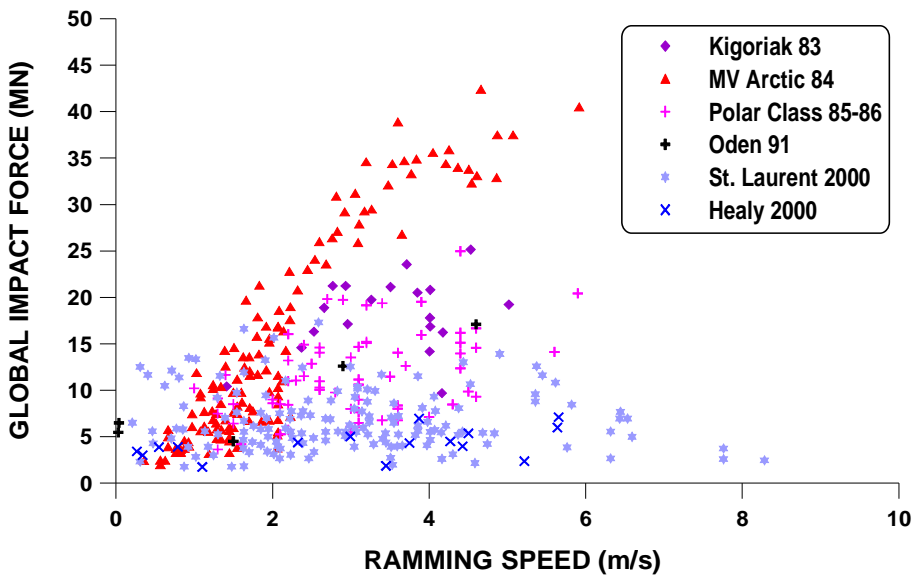


Fig. 3-71 Global ice loads vs. ship speed for all icebreaking vessels

(2) 국부 빙압력 (Local Ice Pressure)

본 장에서는 3.1.2절에서 자세히 설명한 국부 빙압력 실측자료를 분석하였다. 국부 빙압력은 전체 빙하중처럼 다양한 빙상환경과 운항조건에서 측정되었지만 대부분의 빙압력 실측자료가 선박의 크기와 충돌속도, 얼음의 재료강도 특성보다 얼음과의 접촉면적의 함수로 표현되어있어 접촉면적이 국부 빙압력을 결정함에 있어 중요한 요소 중 하나임을 알 수 있다.

여기서는 국부 빙압력을 선박과 얼음과의 접촉면적의 함수로 정리하였으며, 시험운항을 실시한 일곱 척의 선박에 대해 국부 빙압력을 동일한 척도(scale)와 단위(unit)로 표시하였다.

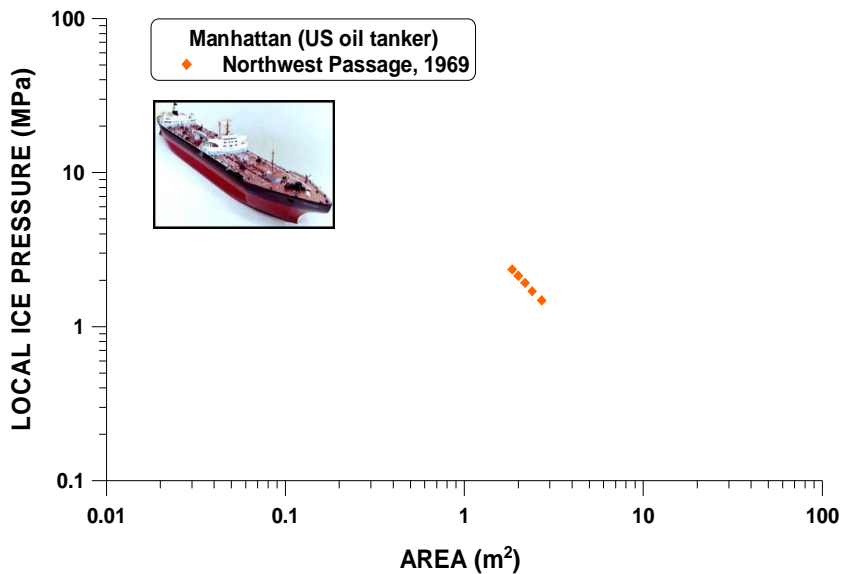


Fig. 3-72 Local ice pressure vs. contact area for US oil tanker Manhattan

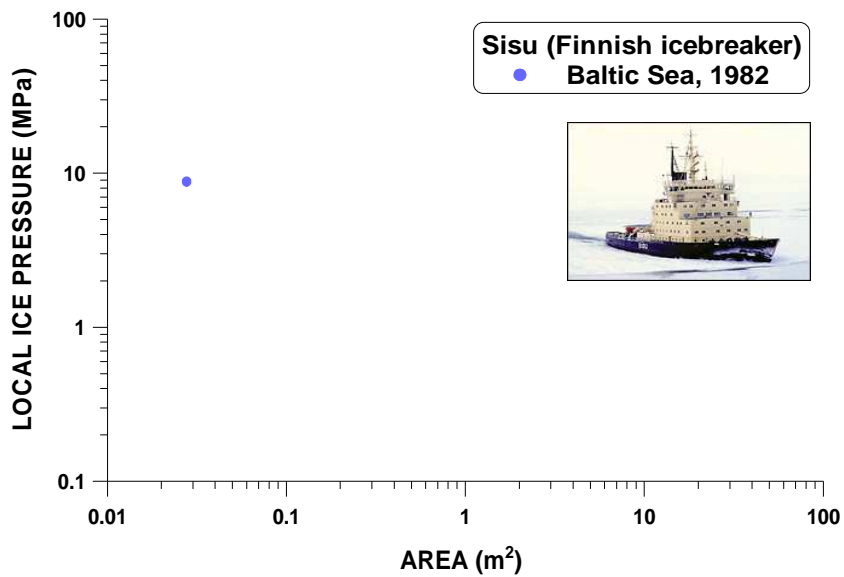


Fig. 3-73 Local ice pressure vs. contact area for Finnish icebreaker Sisu

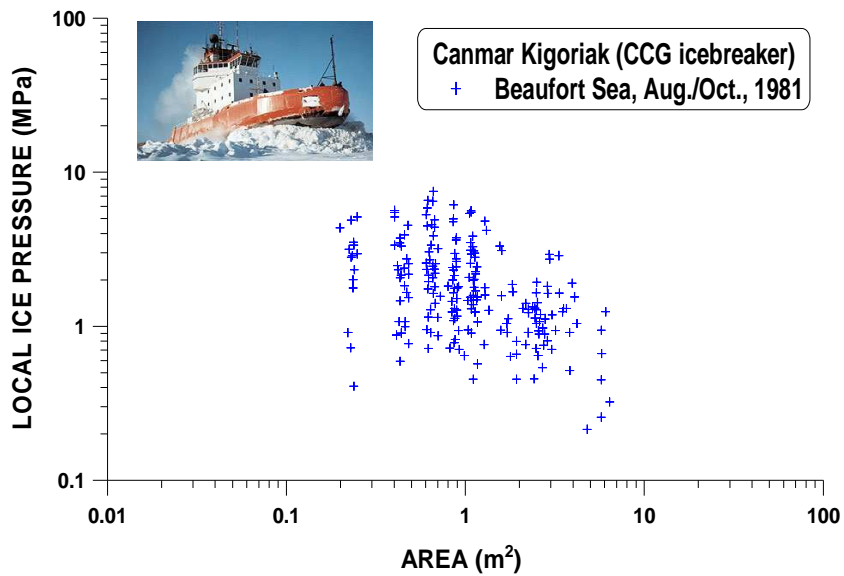


Fig. 3-74 Local ice pressure vs. contact area for Canmar Kigoriak

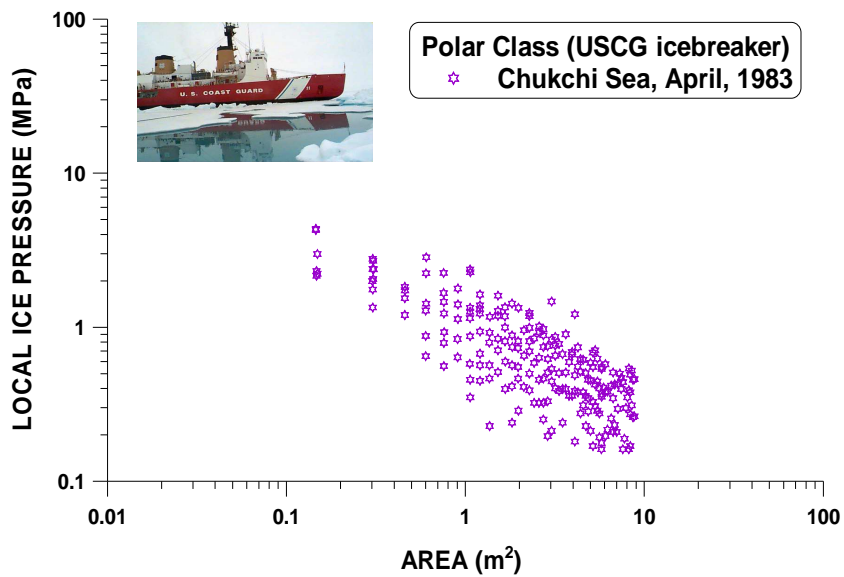


Fig. 3-75 Local ice pressure vs. contact area for Polar class icebreakers

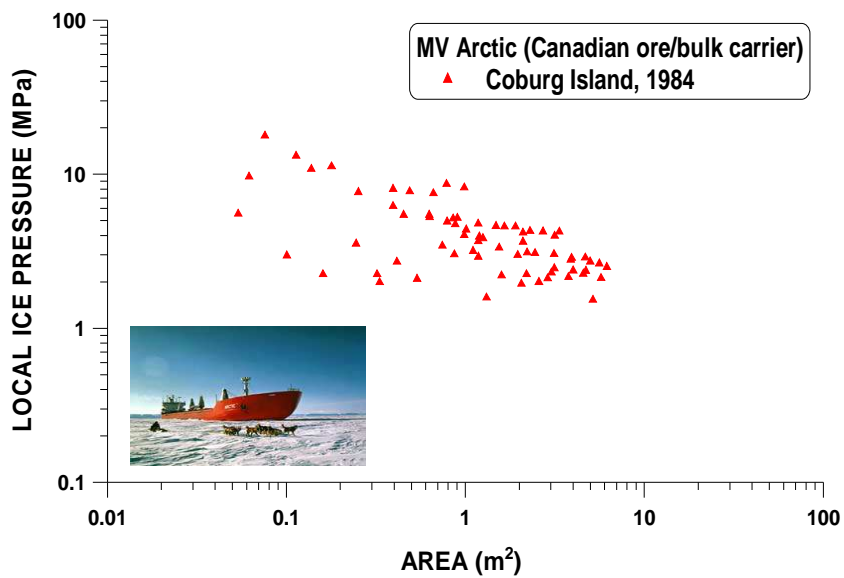


Fig. 3-76 Local ice pressure vs. contact area for 1984 MV Arctic

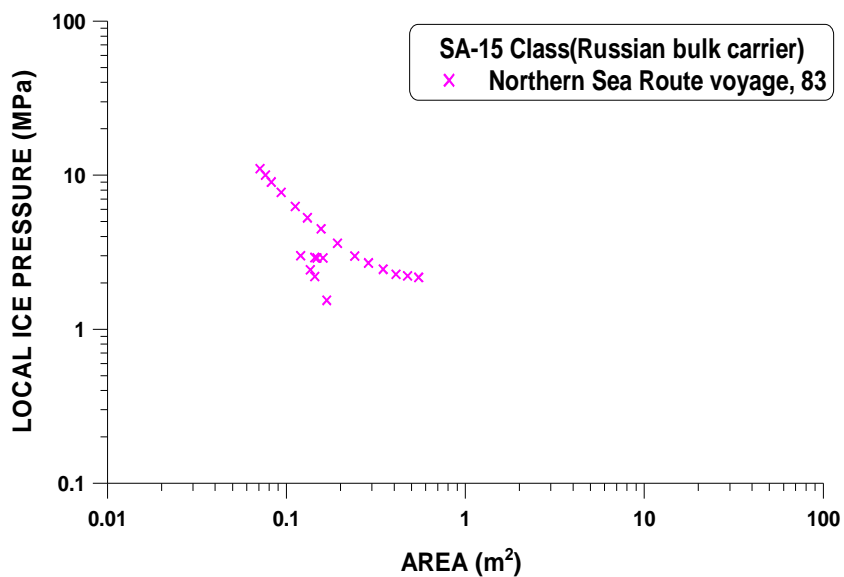


Fig. 3-77 Local ice pressure vs. contact area for SA-15 class ships

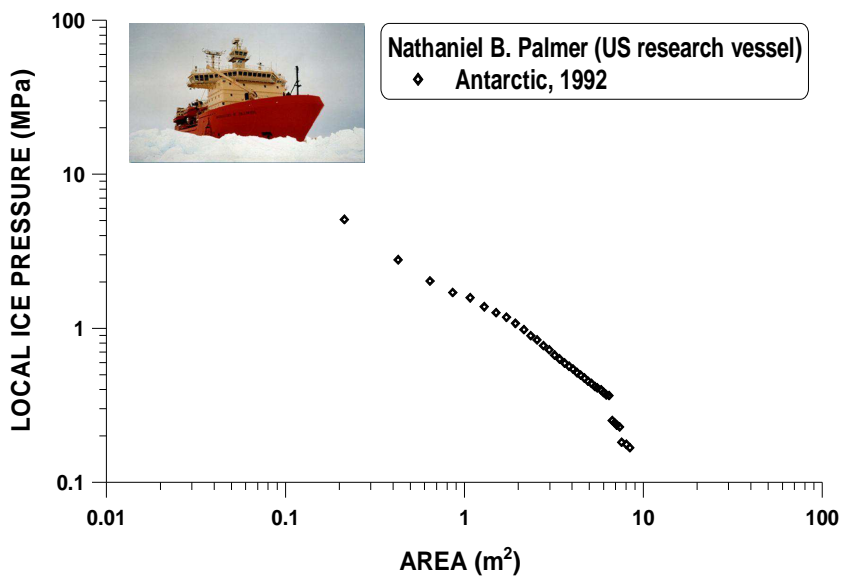


Fig. 3-78 Local ice pressure vs. contact area for Nathaniel B. Palmer

Fig. 3-79는 일곱 척의 쇄빙선박에서 측정된 국부 빙압력과 얼음과의 접촉면적의 관계를 하나의 그래프에 나타낸 것이다. 빙압력 데이터의 경우 대부분이 서로 비슷한 경향을 가지고 있음을 알 수 있는데, 특히 얼음과의 접촉면적이 증가하면 국부 빙압력이 감소한다는 것을 확인할 수 있다. 이는 흔히 척도효과(Scale effect)로서 빙역학에서는 압력-면적(pressure-area)의 관계로 잘 알려져 있으며, 이를 통해 국부 빙압력과 접촉면적과의 연관성을 확인 할 수 있다.

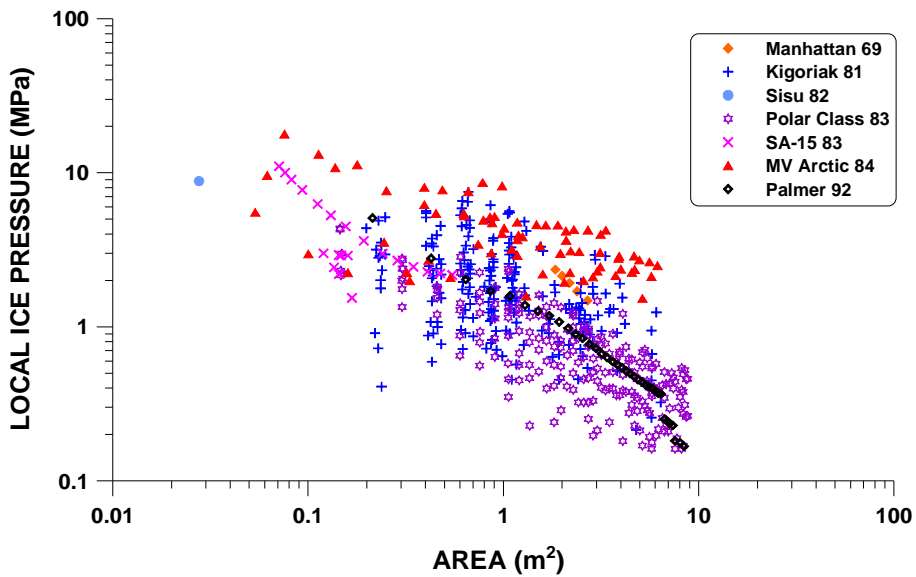


Fig. 3-79 Local ice pressure vs. contact area for all icebreaking vessels

Table 3-16에는 본 연구에서 수집한 실선 시험운항 선박에 대해 정리하였다.

Table 3-16 List of icebreaking vessels for sea trial data measurement

<i>Name of Ship</i>	<i>Type</i>	<i>Length (m)</i>	<i>Displacement (tons)</i>	<i>Data Type</i>	<i>Data Source</i>
Manhattan	oil tanker	307	115,000	LP	Northwest Passage 1969
Canmar Kigoriak	icebreaker	79.3	8,550	GL / LP	Beaufort Sea 1981, 83
Polar Sea	icebreaker	107.3	13,190	GL / LP	Beaufort Sea 1985, 86
MV Arctic	ore/bulk Carrier	206	38,100	GL / LP	Baffin Bay 1984
Oden	icebreaker	107.8	13,000	GL	Polar Crossing 1991
SA-15	multi-purpose cargo ship	159.6	25,900	LP	Northern Sea Route 1983
Louis S. St. Laurent	icebreaker	110.3	12,875	GL	Polar Crossing 2000
Sisu	icebreaker	96	-	LP	Baltic Sea 1982
N.B Palmer	research vessel	93.7	6,417	LP	Antarctica 1992
Healy	icebreaker	120.8	15,965	GL	Labrador Sea 2000
<i>Remarks</i>	<i>GL: Global Ice Load</i> <i>LP: Local Ice Pressure</i>				

3.2 빙하중 추정 경험식

3.2.1 전체 빙하중 추정식

빙하중 산정은 빙해역을 운항하는 쇄빙선박의 설계 시 가장 중요한 부분을 차지한다. 이는 선체구조에 영향을 미치는 요소로서 선박의 종강도상의 문제나 진동문제를 유발시키기 때문이며, 구조적 관점에서 극한 빙하중의 산정은 매우 중요하다. 흔히 극한 빙하중은 선박과 얼음의 충돌 시 얼음이 깨어지지 않는 경우 발생한다.

80~90년대 러시아, 캐나다, 핀란드 등에서는 빙하중에 산정에 관해 집중적으로 연구를 수행하였으며, 어느 정도의 결실도 맺었다. 하지만 빙하중에 의해 발생하는 문제점을 해결하기 위해서는 빙-선체 상호작용에 대한 이해가 필수적인데, 실제 빙해역에는 다양한 빙상상태가 존재하므로 선체와 얼음의 상호작용 모드가 매우 복잡하여 아직까지도 명확한 해법은 알려져 있지 않다.

빙하중을 산정하는 방법에는 여러 가지가 해법이 존재하는데, 여기서 중요한 사항은 빙하중 산정 시 어떠한 요소를 중요변수로 취급할 것인지 결정하는 것이다. 전체 빙하중의 경우에는 빙판의 파괴모드(failure mode)가 이를 분류할 수 있는 기준이 된다. 앞서 언급한 바와 같이 선박이 무한히 큰 규모의 얼음과의 충돌 시 얼음의 파괴는 순전히 crushing mode로서 선박의 운동에너지에 의해 전체 빙하중이 결정되고 이는 선박의 속도와 배수량의 함수로서 이들이 주요 변수가 된다. 반면 유한한 크기의 얼음일 경우 crushing mode와 bending mode를 함께 고려해야하므로 전체 빙하중은 얼음의 굽힘강도 및 두께, 선박의 배수량 및 충돌속도를 통해 결정된다.

전체 빙하중의 개념과 빙-선체 상호작용 모드에 대한 연구는 Popov et al.(1968)와 Enkvist(1979)에 의해 수행되었으며, 이는 빙하중 문제를 이해하는데 있어 상당한 도움이 되었다. 이후 빙판의 파괴모드 해석 및 빙-선체 상호작용 모델링이 중점적으로 연구되었지만 빙하중 실측자료의 부족으로 큰 성과를 거두진 못했다. 하지만 캐나다의 Canmar Kigoriak호와 미국의 Polar class 쇄빙선의 건조와 더불어 빙해역 실선 시험운항을 통한 빙하중 실측자료가 수집되면서 Johansson et al.(1981), Tunik(1982), Glen and Daley(1982), Keinonen(1983), Ghoneim et al.(1984), Daley et al.(1984) 등에 의해 선박의 종강도상의 관점에서 여러 전체 빙하중 추정 경험식이 제안되었다.

여기서는 선수부에 작용하는 전체 빙하중을 극한 빙하중으로 보고 이를 추정하는 경험식에 대해 정리하였다.

Johansson et al.(1981)은 Canmar Kigoriak호에 대해 전체 빙하중을 선수부에 작용하는 수직한 방향의 힘으로서 극한 빙하중으로 가정하고, 이를 선박의 충돌속도의 함수로 다음과 같이 나타내었다.

$$F_{\max} = V\Delta^{0.9} \text{ [MN]} \quad (3-2)$$

여기서 $V(\text{m/s})$ 는 선박의 충돌속도이고, $\Delta(10^3\text{ton})$ 은 선박의 배수량이다.

Johansson et al.(1981)이 제안한 전체 빙하중 추정식의 경우 선체에 수직한 방향의 전체 빙하중은 식 3-2에 Canmar Kigoriak호의 선수 형상(선수각 $\gamma = 23^\circ$)을 고려한 $\cos \gamma$ 를 곱하면 된다. Fig. 3-80에서는 Canmar Kigoriak호의 시험 운항을 통해 얻어진 빙하중 데이터와 Johansson et al.(1981)이 제안한 빙하중 추정식과의 관계를 보여주고 있다.

또한 Johansson은 Canmar Kigoriak호와 다른 선수 형상을 가진 선박에 대해 적용가능 하도록 식 (3-2)를 다음과 같이 수정하였다.

$$F_{\max} = 2.5 V \sin \gamma \Delta^{0.9} \text{ [MN]} \quad (3-3)$$

여기서 $\gamma(\text{deg})$ 은 대상 선박의 선수각이다.

Tunik(1982) 또한 전체 빙하중 추정식을 제안하였는데, Johansson et al.(1981)의 추정식과 함께 Fig. 3-80에 나타내었다.

$$F_{\max} = k V^{1.5} \Delta^{2/3} \text{ [MN]} \quad (3-4)$$

여기서 k 는 선박의 형상에 대한 계수로서 Canmar Kigoriak호의 경우 $k = 0.65$ 이고 $V(\text{m/s})$ 는 선박의 충돌속도, $\Delta(10^3\text{ton})$ 은 선박의 배수량이다.

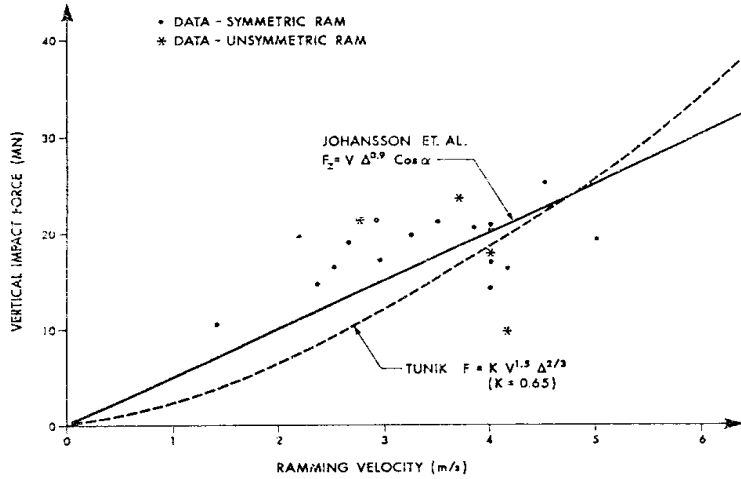


Fig. 3-80 Extreme ice forces on Canmar Kigoriak vs. ship's speed (Ghoneim et al., 1984)

Fig. 3-80을 보면 Johansson et al.(1981)이 제안한 추정식의 경우 전체 빙하중은 저속에서는 Canmar Kigoriak호의 실선 데이터보다는 낮고 고속에서는 실선 데이터보다 높게 계산되는 경향을 보이고 있지만, Tunik의 추정식보다는 비교적 실선 데이터를 잘 반영하고 있는 것처럼 보인다.

한편 Tunik(1985)은 충격쇄빙 시 선수부에 발생하는 극한 빙하중은 선수부의 기하학적 형상에 따라 30% 정도 차이가 날 수 있다고 주장하였다. 그래서 Tunik은 둥근 선수부(spoon-shaped bow)와 각진 선수부(wedge-shaped bow)에 대한 각각의 전체 빙하중(MN) 추정식을 제안하였다.

$$F_{\max} = 0.036 V^{1.3} \Delta^{0.6} \sigma_c^{0.4} S_1 B^{0.4} \quad \text{for a spoon-shaped bow} \quad (3-5)$$

$$F_{\max} = 0.027 V^{1.5} \Delta^{0.7} \sigma_c^{0.3} S_2 \quad \text{for a wedge-shaped bow} \quad (3-6)$$

여기서 S_1 , S_2 는 선수부 형상을 대변하는 형상계수이고 σ_c (MPa)는 얼음의 압축강도이다. 그리고 V (m/s)는 선박의 충돌속도이며, Δ (10^3 ton)은 선박의 배수량이다.

Keinonen(1983) 역시 Canmar Kigoriak호의 빙하중 실선 데이터 분석을 통해 다음과 같은 추정식을 제안하였다. 여기서 $V(\text{m/s})$ 는 선박의 충돌속도이고, $\Delta(10^3\text{ton})$ 은 선박의 배수량이다.

$$F_{\text{max}} = 0.48 V^{1.37} \Delta^{0.9} \text{ [MN]} \quad (3-7)$$

Keinonen이 제안한 전체 빙하중 추정식의 경우도 Johansson의 경우처럼 Canmar Kigoriak호와 다른 선수 형상을 가진 선박에 적용하려면 선속에서 선수각의 영향을 고려해야한다 (Glen et al., 1985).

Daley(1984)는 두꺼운 다년생빙과의 충돌 시 발생하는 빙하중은 선박의 선수부에 작용하는 수직한 방향의 충돌속도(normal velocity)와 선박의 배수량(displacement)에 의해 좌우된다고 가정하고 Polar Sea 쇄빙선의 빙하중 실측자료와 함께 빙하중 산정 전산 프로그램 "BAFFIN"을 이용해 다음과 같은 빙하중 추정식을 제안하였다. 단 Daley가 제안한 전체 빙하중 추정식의 경우 선박의 충돌속도와 배수량이 큰 경우 매우 비현실적인 값이 계산되기 때문에 사용 시 주의가 필요하다.

$$F_{\text{max}} = 8 (V \cos \gamma)^{4/3} \left(\frac{\Delta}{1 + 2.65 \sin \gamma} \right)^{3/5} \text{ [MN]} \quad (3-8)$$

여기서 $V(\text{m/s})$ 는 선박의 충돌속도이고, $\gamma(\text{deg})$ 는 선수각, $\Delta(10^3\text{ton})$ 은 선박의 배수량이다.

"BAFFIN"은 Daley가 개발한 전산 프로그램으로서 빙-선체 상호작용 시뮬레이션을 통해 선박에 작용하는 빙하중을 계산한다. 이 모델은 무한히 규모가 큰 얼음(semi-infinite ice feature)과의 충돌을 전제로 하였으며, 얼음의 파괴는 crushing mode로 가정하였다.

한편 캐나다 해안 경비대는 CASPPR(Canadian Arctic Shipping Pollution Prevention Regulations) 규정에 따른 북극해 운항용 쇄빙선을 건조 계획을 세웠다. 쇄빙선 설계를 위해 북극해 빙상환경 조사와 함께 실선 시험운항에서 다년생빙과의 충돌 시 측정된 극한 빙하중을 고려하였다. 이를 통해 빙해역을 운항하는 선박의 구조적 안전성과 보다

뛰어난 쇄빙능력을 갖출 수 있도록 기존 CASPPR 규정의 보완이 필요함을 입증하였다.

캐나다 해안 경비대는 선박에 작용하는 빙하중을 구하기 위해 Johansson의 수정된 식(3-3)과 Keinonen의 식(3-7) 그리고 "BAFFIN"을 이용해 쇄빙선(미건조) Polar 8 class에 적용해 보았다 (Fig. 3-81).

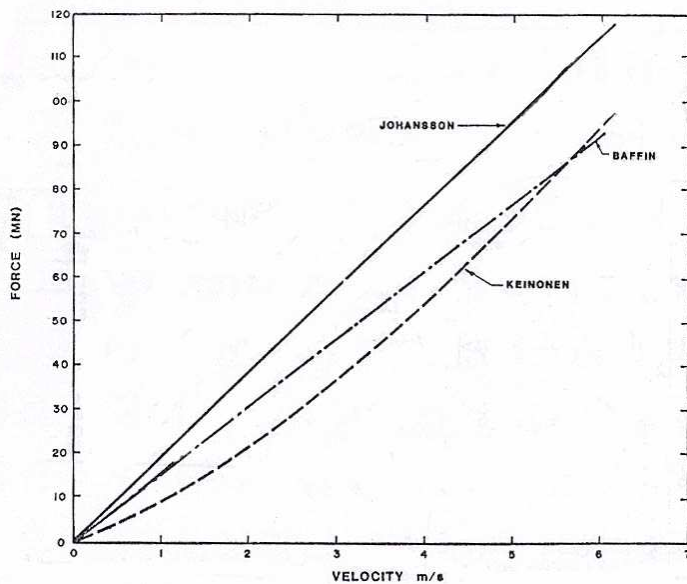


Fig. 3-81 Extreme ice forces on Polar 8 class icebreaker vs. ship's speed. (Glen et al., 1985)

여기서 보면 Polar 8 class 쇄빙선에 대해 6m/s(11.7knots) 충돌속도에서 Johansson의 수정된 식(3-3)에서는 115MN이 계산되고 Keinonen의 식(3-7)에서는 98.5MN이 계산되었다. "BAFFIN"을 이용해 계산된 극한 빙하중은 84~94MN 정도인데, Johansson의 수정된 식보다 Keinonen과 "BAFFIN"에 의해 계산된 빙하중이 보다 빙-선체 상호작용을 잘 대변하는 것으로 보이며, 이로 부터 극한 빙하중을 90MN 정도로 가정하고 해석하였다. 계획 중인 Polar 8 쇄빙선의 제원은 Table 3-17과 같다.

Table 3-17 Dimension of the Polar 8 icebreaker

선박 제원	길이(Length)	L_{pp} (m)	173.50
	폭(Moulded Breadth)	B (m)	30.57
	깊이(Moulded Depth)	D (m)	18.75
	흘수(Draft)	d (m)	12.50
	배수량(Displacement)	Δ (tons)	37,700
선박 성능	기관출력(Engine Power)	(MW)	75.0
선수 형상	선수각(Stem Angle)	γ (deg)	17
빙등급	Ice class	CASPPR Arctic class 8	

캐나다 ACL에서는 MV Arctic호에 작용하는 전체 빙하중을 추정하기 위하여 1:40 축척의 모형선을 제작하여 얼음의 재료특성과 비슷한 합성빙 MODICE에서 모형시험을 수행하였다. 모형시험에서 선속이 4~12knots(2.06~6.17m/s)인 구간은 실선으로 확장한 결과이며, 12knots(6.17m/s) 까지는 선박에 수직으로 작용하는 전체 빙하중을 다음 식으로 나타낼 수 있다 (Daley et al., 1986). 하지만 이식은 MV Arctic호와 유사한 선박에만 적용가능하다. 여기서 V (m/s)는 선박의 충돌속도이고, Δ (10^3 ton)은 선박의 배수량이다.

$$F_{\max} = 1.132 V^{0.388} \Delta^{0.809} \text{ [MN]} \quad (3-9)$$

Riska(1994) 또한 다음과 같은 빙하중 추정식을 제안하였는데, 본 연구에서는 이 식이 극한 빙하중을 추정하는지 여부와 적용 대상 선박이나 적용조건은 확인하지 못하였다.

$$F = 0.766 \kappa^{0.4} (\sin \gamma)^{0.2} (\Delta \rho g S)^{0.5} V \quad (3-10)$$

여기서 κ 는 무차원화된 얼음의 압축강도, γ 는 선수각, Δ 는 배수량, S 는 수선면적, ρ 는 해수의 밀도, g 는 중력가속도이다.

1995년 새롭게 개정된 캐나다 CASPPR에서는 충격쇄빙 시 선박에 작용하는 최대 빙하중을 다음과 같은 식으로 제시하였다. 여기서 Δ (10^3 ton)는 배수량이고 P_S (MW)는 축마력을 나타낸다.

$$F_{\max} = 2.6 \Delta^{0.9} [1 + (P_S/\Delta^{2/3})^{1/3}] \text{ [MN]} \quad (3-11)$$

캐나다 북극해의 천연가스의 운반을 위해 북위 75도 Melville섬까지 연중 운항할 목적으로 IACS-UR 규정에 따른 Polar class 쇄빙 LNG선의 개념설계를 수행한 것이 발표되었는데, 이때 선체 구조설계를 위해 최대 빙하중을 추정하는 경험식이 제시되었다. 이 식은 Manhattan, MV Arctic, Canmar Kigoriak, Robert LeMeur, Polar Sea 등 5척의 실선 계측자료로부터 유추된 것이다 (Dick et al. 2006). 여기서 $V(\text{m/s})$ 는 선박의 충돌속도이고, $\Delta(10^3\text{ton})$ 은 선박의 배수량이다.

$$F_{\max} = 1.6 V \Delta^{2/3} \text{ [MN]} \quad (3-12)$$

건조 계획 중이라 발표된 쇄빙 LNG선의 제원은 Table 3-18과 같다.

Table 3-18 Dimension of the PC 2 LNG vessel

선박 제원	길이(Length)	$L_{pp}(\text{m})$	307.0
	폭(Moulded Breadth)	$B(\text{m})$	40.0
	깊이(Moulded Depth)	$D(\text{m})$	30.5
	흘수(Draft)	$d(\text{m})$	13.25
	배수량(Displacement)	$\Delta(\text{tons})$	130,000
선박 성능	기관출력(Engine Power)	(MW)	92.0
빙등급	Ice class	IACS-UR PC 2 평탄빙 2.4m@3knots	

앞서 정리된 전체 빙하중 추정식의 경우 무한히 크기의 얼음과 충격쇄빙 시 선수부에서 작용하는 극한 빙하중을 계산하는 경험식으로서 추정식 대부분은 극한 빙하중을 선박의 속도와 배수량을 통해 결정한다. 이와 달리 얼음의 두께가 얇거나 규모가 유한한 경우 충돌 시 전체 빙하중은 얼음의 굽힘강도 및 두께, 충돌지점에 대한 수직한 방향의 속도성분과 관련된다.

Daley et al.(1984)는 1983년 Polar Sea의 Chukchi해 시험운항에서 얻어진 212개의 충돌 이벤트를 통해 무차원화된 다음과 같은 전체 빙하중 추정식을 제안하였다 (Fig. 3-82 참조).

$$F_{\max} = 1.29 \rho g h^3 \left\{ \frac{\sigma_f}{\rho g h} \times \frac{Vl}{\sqrt{gh}} \right\}^{1.4566} \quad [\text{MN}] \quad (3-13)$$

여기서 $V(\text{m/s})$ 는 선박의 속도, $h(\text{m})$ 는 빙판의 두께, $\sigma_f(\text{MPa})$ 는 얼음의 굽힘강도, $\rho (\text{kg/m}^3)$ 는 물의 밀도, $g(\text{m/s}^2)$ 은 중력가속도, l 은 방향여현이다.

특히 방향여현 $l = \tan \alpha / \sqrt{\tan^2 \alpha + \tan^2 \beta + 1}$ 은 수선면각(waterline half-angle) α 와 플레어각(flare angle from the vertical) β 의 함수로서 Polar Sea의 경우 $\alpha=30^\circ$, $\beta=54^\circ$ 이므로 $l=0.3$ 이다. 그리고 계수 1.29와 1.4566은 회귀분석(regression analysis)을 통해 얻어진 값이다.

또한 White는 실측자료를 분석하여 충격쇄빙 시 빙판에 가하는 수직하향력을 다음과 같이 나타내었다.

$$F_{\max} = 6.64 V (WR \times \Delta)^{0.845} \quad [\text{lb}] \quad (3-14)$$

여기서 $V(\text{ft/sec})$ 는 선박의 속도, $\Delta(\text{lb})$ 는 배수량이고, WR 은 선박의 쇄빙성능을 나타내는 White Ratio를 의미한다.

한편 빙판의 굽힘파괴현상을 탄성지지기반위의 평판거동에 관한 이론을 바탕으로 해석하기위한 연구도 진행되었다 (Korzhavin, 1962). 이는 빙판의 내하중 능력(bearing capacity)으로부터 선박에 작용하는 빙하중을 추정하는 방법이지만 빙판에 작용하는 수직하중만을 고려했기 때문에 실제 현장에서는 수직하중과 수평하중이 함께 발생하므로 계측된 빙하중 값과는 차이가 존재하였다.

White(1970)는 탄성지지기반에서의 단순보이론을 바탕으로 수직 방향의 힘 F_V 와 파괴시킬 수 있는 빙판의 최대의 두께 h 를 다음과 같은 관계로 나타내었다.

$$F_V = 0.425 \sigma_f h^2 \text{ [lb]} \quad (3-15)$$

여기서 σ_f (psi)는 빙판의 인장강도이며, h (ft)는 빙판의 두께이다.

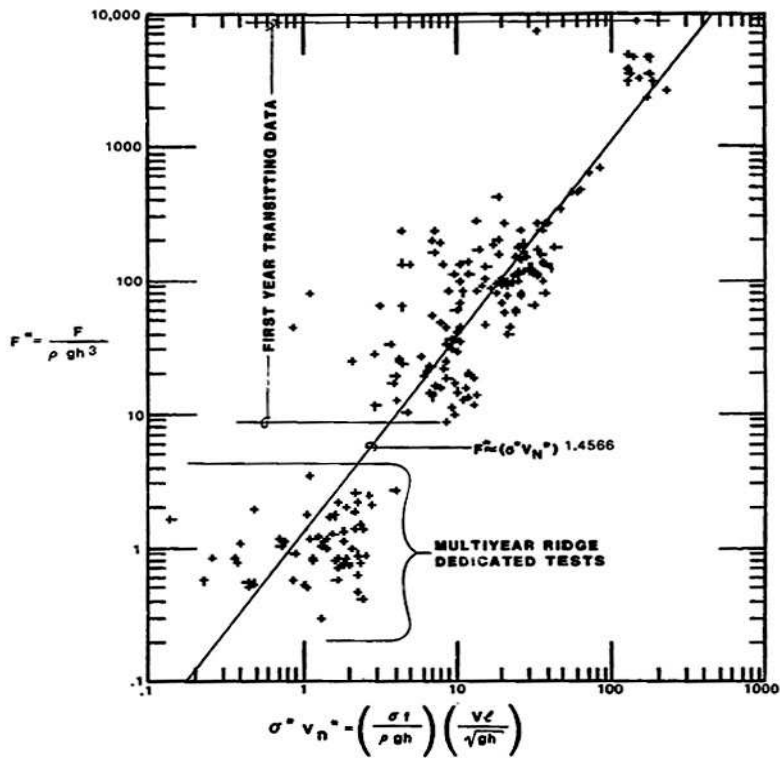


Fig. 3-82 Non-dimensional maximum ice force and normal velocity times flexural strength for the Polar Sea, 1983 measured data (SNAME SSC Report No.329, 1990)

지금까지 기 발표된 문헌을 중심으로 빙해역 운항 시 선박에 작용하는 전체 빙하중 추정 경험식을 정리하면 다음과 같다.

전체 빙하중 추정식의 경우 실선 시험운항을 통해 계측된 자료를 바탕으로 추론되었기 때문에 시험운항에 사용되었던 선박이나 그와 유사한 선박에 대해 전체 빙하중은 비교적 잘 일치하지만 선박의 크기나 선수 형상이 다른 선박의 경우 예상되는 전체 빙하중의 신뢰성은 매우 떨어진다. 이처럼 어떠한 전체 빙하중 추정식도 모든 선박의 빙하중 자료를 대변할 순 없는 것으로 판단된다. Fig. 3-83은 Fig. 3-71을 다시 가져온 것으로 쇄빙선박의 전체 빙하중 자료를 선박의 충돌속도의 함수로서 하나의 그래프에 정리한 것이다. 여기서 보면 전체 빙하중과 선박의 충돌속도와의 관계를 이해할 수 있는데, 이는 바로 선박의 충돌속도가 증가하면 선박에 작용하는 전체 빙하중도 함께 증가한다는 점이다. 그러므로 빙하중 추정식은 전체 빙하중과 선박의 충돌속도와의 연관성이 파악하는 것이 중요하다.

Fig. 3-84에는 수집된 실선 빙하중 자료와 함께 앞서 정리된 몇 가지 빙하중 추정식을 함께 도시해보았다. 이는 전체 빙하중의 경우 대부분의 경험식이 선박의 충돌속도와 배수량의 함수로 표현되지만 얼음의 재료특성과 선수각, 엔진출력 등의 함수이기도 하므로 모든 추정식을 동시에 나타내기는 불가능하기 때문이다. Fig. 3-84를 보면 동일한 선박에 대해 빙하중 추정식을 사용하여 전체 빙하중을 추정한 경우 추정식간에 상당한 편차가 존재함을 알 수 있다. 이는 언급한 바와 같이 빙하중 추정식이 일부 선박의 실측자료를 바탕으로 얻어진 경험식이기 때문이다. 그러므로 모든 선박에 적용 가능한 전체 빙하중 추정식을 산정하는 것은 매우 어려운 작업이며, 이것이 빙하중 산정 문제의 일반적인 현상이다.

최근 쇄빙상선에 대한 수요가 증가할 것으로 판단되어 본 연구에서는 이러한 관점을 바탕으로 MV Arctic호와 같은 쇄빙상선 모델에 대해 간단하고 실용적인 형태의 전체 빙하중 추정식을 제안하였다. Fig. 3-85를 보면 새롭게 제안된 전체 빙하중 추정식의 경우 MV Arctic호의 빙하중 자료를 바탕으로 전체 빙하중을 극한 빙하중의 관점에서 자료의 최대값을 잘 대변할 수 있도록 구성하였다.

$$F_{max} = 2.55 V \Delta^{0.4} \text{ [MN]} \quad (3-16)$$

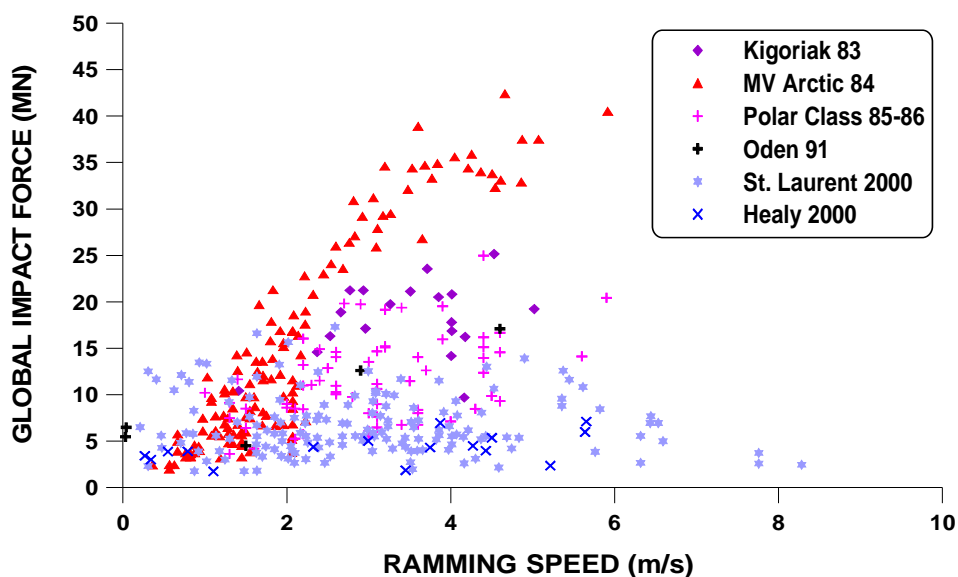


Fig. 3-83 Global ice loads vs. ship speed for six icebreaking vessels

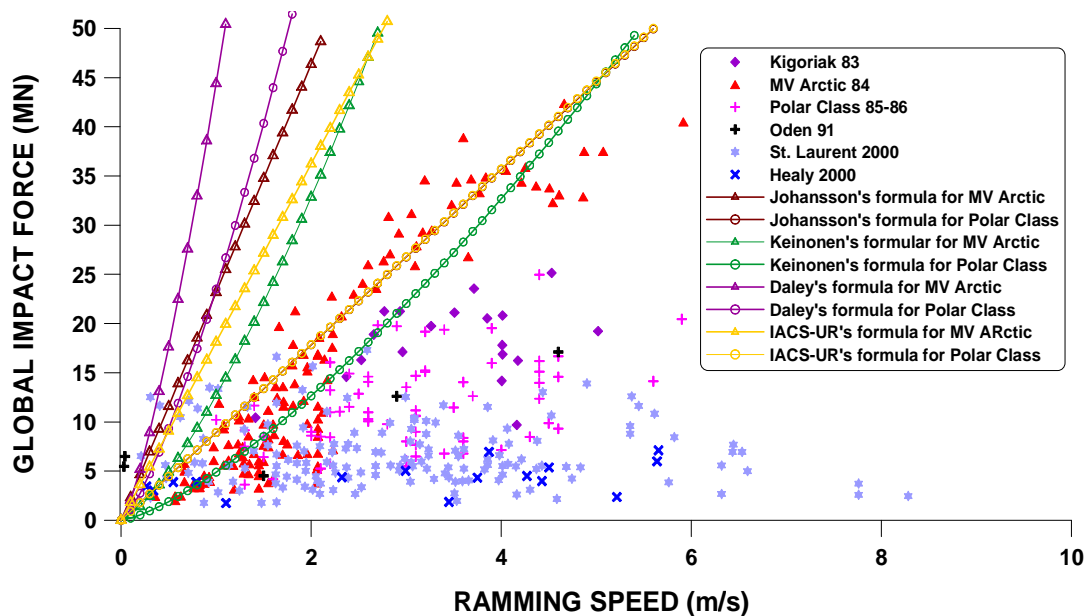


Fig. 3-84 Global ice loads vs. ship speed data and several global ice load prediction equations

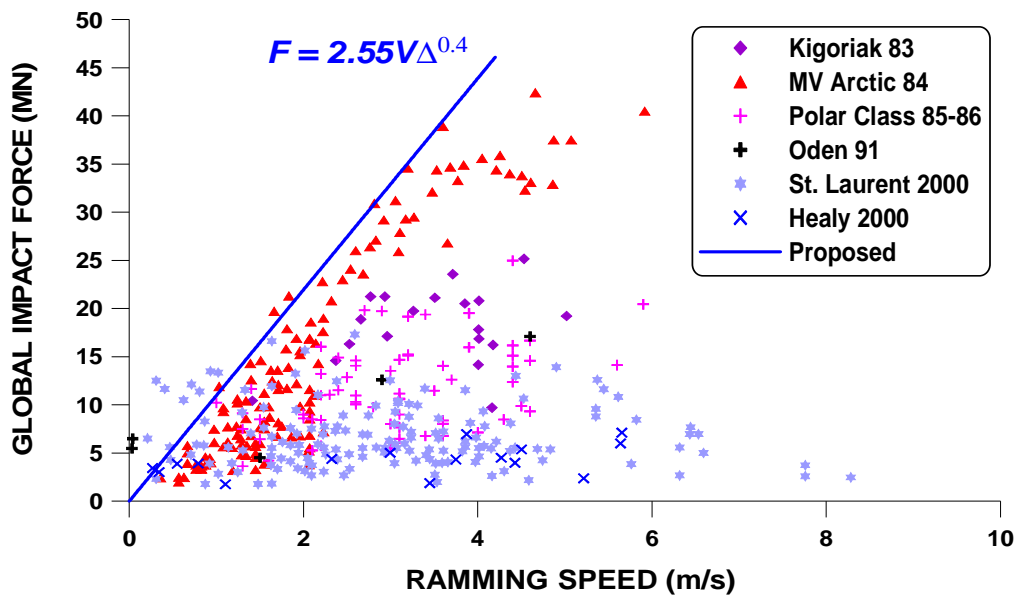


Fig. 3-85 Global ice loads vs. ship speed data and the proposed global ice load prediction equation

3.2.2 국부 빙압력 추정식

빙해역 운항 시 발생하는 전체 빙하중과 국부 빙압력에 의해 선박은 구조적으로 많은 문제가 발생하는데, 특히 국부 빙압력은 얼음과의 충돌 시 선체 외판 혹은 그 주변 구조부재에 직접 작용하여 선체의 손상을 유발시킨다. 일반적으로 국부 빙압력에서는 얼음의 파괴모드를 crushing으로 가정하고 있으며, 대부분의 연구자들은 빙압력을 선박의 선수 형상, 선박의 크기나 충돌속도 보다는 얼음과의 접촉면적의 함수로서 이해하고 있다.

캐나다에서는 얼음과의 충돌 시 발생하는 빙압력에 대해 많은 연구를 수행하였다. 특히 쇄빙선 Canmar Kigoriak호와 Polar Sea, MV Arctic호 등의 실측 빙압력 자료를 바탕으로 빙해역 운항 선박의 안전성을 확보하기 위해 이전보다 빙압력을 보다 높게 설정하여 기존의 CASPPR 규정을 새롭게 보완하였다.

여기서는 빙해역 운항 시 선박에 작용하는 국부 빙압력을 추정하는 경험식에 대해 정리하였다.

앞서 언급한 바와 같이 Canmar Kigoriak호의 시험 운항을 통해 빙하중과 빙압력을 계측하였다. 여기서 Johansson et al.(1981)은 Canmar Kigoriak호의 빙압력 자료를 바탕으로 다음과 같은 국부 빙압력 추정식을 제안하였다.

$$P = p_0 - \frac{p_0 - p_r}{A_r} A \quad [\text{MPa}] \quad (3-17)$$

여기서 $p_0 = 3 + 0.85(\Delta P_s)^{1/3}$ 는 선수부에 작용하는 국부 빙압력으로서 $\Delta(10^3\text{ton})$ 는 선박의 배수량이고 $P_s(\text{MW})$ 는 선박의 축마력이다. $p_r(\text{MPa})$ 과 $A_r(m^2)$ 는 각각 기준압력(reference pressure)과 기준면적(reference contact area)을 나타내며, 이는 $p_r = F_{\text{max}}/A_r$ 와 $A_r = [12 F_{\text{max}} + 81]^{1/2} - 9$ 로 정의된다. 또한 F_{max} 는 선박의 선수부에 작용하는 전체 빙하중으로서 $F_{\text{max}} = V\Delta^{0.9}$ 로 정의된다. Canmar Kigoriak호의 경우 $p_0 = 6.8\text{MPa}$ 이고 $F_{\text{max}} = 45\text{MN}$, $A_r = 15.9\text{m}^2$, $p_r = 2.8\text{MPa}$ 이다. Johansson이 제안한 국부 빙압력 추정식과 Canmar Kigoriak호의 실측자료와 비교한 것이 앞서 Fig. 3-44에 나타나 있다. 또

한 Fig. 3-51에는 Polar Sea에 대한 국부 빙압력 추정식과 실측자료를 국부 빙압력과 접촉면적의 관계로 나타나 있다.

핀란드의 VTT(Technical Research Center of Finland, 1982)에서는 캐나다의 의뢰를 받아 Canmar Kigoriak호와 MV Arctic호의 빙하중 실선 계측장치를 개발하였는데, 이때 국부 빙압력(MPa)을 접촉면적(m^2)의 함수로서 다음과 같이 제안하였다.

$$P = 4.4 A^{-0.5} \quad \text{for Canmar Kigoriak} \quad (3-18)$$

$$P = 4.57 A^{-0.35} \quad \text{for MV Arctic} \quad (3-19)$$

새롭게 개정된 CASPPR 규정에서는 다년생빙과의 충돌 시 측정된 자료를 통해 국부 빙압력과 접촉면적과의 관계를 결정하는 것이었고 여기서 최대 빙압력은 접촉면적이 작을 때 발생한다. Glen et al.(1985)은 최대 빙하중의 크기 F_{max} 를 이용하여 국부 빙압력 경험식을 다음과 같이 제시하였다.

$$P = \frac{F_{max}}{A} \left[1 - \frac{1}{1.24 \left(\frac{52A}{F_{max}} \right)^{0.85}} \right] \text{ [MPa]} \quad (3-20)$$

여기서 $A(m^2)$ 는 접촉면적이고 $F_{max}(MN)$ 는 Daley et al.(1984)가 제시한 식(3-8)을 이용해서 계산한다.

Riska and Frederking(1987)은 캐나다의 NRC와 핀란드의 VTT와의 공동연구에서 Varsta(1987)가 수행했던 접촉계수에 관한 연구의 고찰을 통해 접촉함수를 평균 빙압력과 기준 빙압력의 비로서 $f(A) = P_{av}/P_{nom}$ 로 정의하였다. 그들은 두꺼운 다년생빙에서 수행되었던 MV Arctic호의 ramming test를 통해 접촉함수와 빙압력 비에 대한 $f(A) = P_{av}/P_{nom} = 0.30[A/A_0]^{-0.41}$ 관계식을 얻었다. 이 때 $-10^\circ C$ 에서 $P_{nom} = 14.2 \text{ MPa}$ 였고 $A_0 = 1 \text{ m}^2$ 이므로 이를 통해 다음과 같은 빙압력과 접촉면적의 관계식을 제안하였다.

$$P = 4.3 A^{-0.41} \text{ [MPa]} \quad (3-21)$$

Masterson and Frederking(1993)은 MV Arctic호와 Canmar Kigoriak호의 빙압력 실선 계측자료와 함께 빙해역 현장 계측자료(Pond Inlet, Hobson's Choice, Resolute Flat Jack Tests)를 정리하여 접촉면적의 함수로서 하나의 그래프에 모두 나타내었다 (Fig. 3-86). 여기서 모든 빙압력 자료의 평균값을 1점쇄선으로 표시하였고 평균으로부터 표준편차의 2배를 실선으로 나타내었다. 이때의 빙압력(MPa) 추정식은 다음과 같다.

$$P = 8.1 A^{-0.572} \quad \text{for } A \leq 19\text{m}^2 \quad (3-22)$$

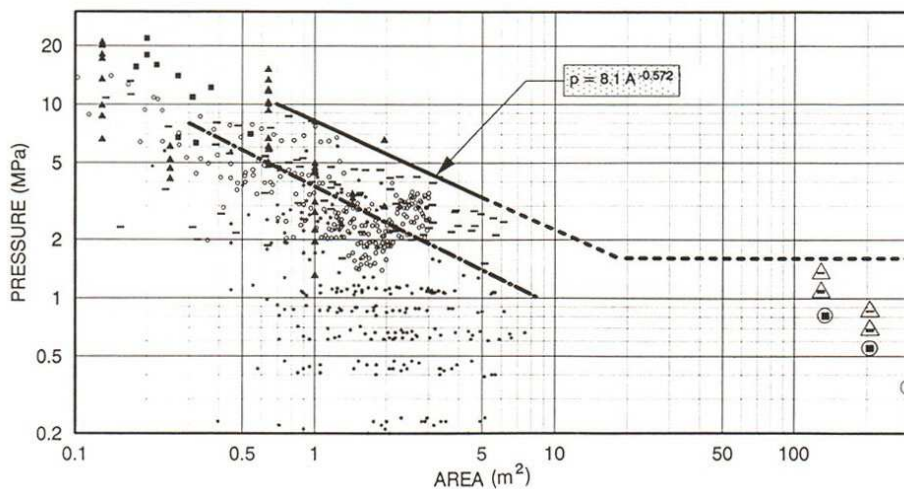


Fig. 3-86 Local ice pressure vs. contact area: combined data; (○)3m² Pond Inlet Tests, (-)MV Arctic, (■)1989 Hobson's Choice Tests, (*)Canmar Kigoriak, (▲)Resolute Flat jack Tests, (— · — · —)Mean all data, (——)2×(standard deviation). (Masterson and Frederking, 1993)

Sanderson(1988)은 담수빙, 1년생 해빙, 다년생 해빙에서 계측된 선박과 극지해양구조물의 실측자료와 함께 실험실에서 실시된 관입(indentation)시험 자료를 모두 정리하여 이를 압력과 접촉면적의 관계로 정리하였다 (Fig. 3-87). 이는 당시 모든 계측자료의 환경조건이 동일하진 않았지만 접촉면적과 빙압력의 경향을 이해하는데 있어 많은 도움이 되었다. Sanderson은 Weibull(1951)이 고안한 시편크기에 따라 발생하는 균열크기가 비례한다는 관계로부터 계측자료의 상한선으로 관입압력을 다음과 같이 표현하였다.

$$P = c A^{-1/2} \text{ [MPa]} \quad (3-23)$$

Sanderson은 이 상한선이 설계 빙압력을 의미하는 것은 아니지만, 정리된 자료들이 접촉면적의 $-1/2$ 승에 비례한다는 점은 중요한 의미가 있다고 보았다 (Fig. 3-88).

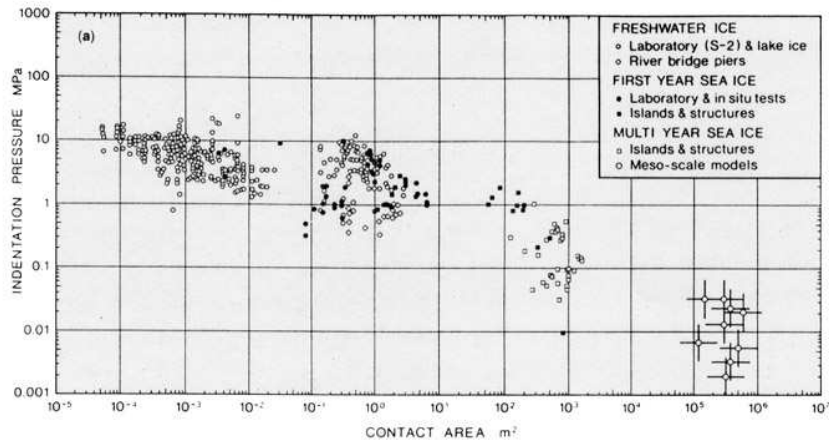


Fig. 3-87 Indentation pressure vs. contact area for various test data (Sanderson, 1988)

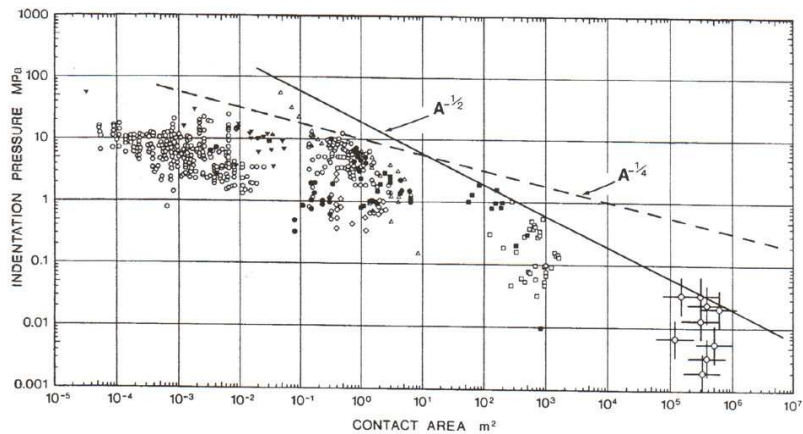


Fig. 3-88 Upper bound curve of the form $P = c A^{-1/2}$ for various indentation pressure data (Sanderson, 1988)

구조물 혹은 선박 등이 얼음과의 충돌 시 실제현상에서는 동시적인 파괴보다는 비동시적인 파괴가 발생한다. Kry(1980b)와 Slomski and Vivatrat(1983)등은 이러한 얼음의 비동시적인 파괴의 통계적인 해석법을 수행하였다.

Ashby et al.(1986) 역시 얼음의 비동시적인 파괴에 대한 이론적 모델을 제시하였는데, Sanderson이 정리한 자료로부터 실험실 규모의 시험과 중간규모 크기의 시험에서 얼음의 압축파괴의 최대압력은 15MPa로, 실선규모의 시험에서는 1~2MPa로 가정하여 다음과 같이 나타내었다. (Fig. 3-89).

$$P = 0.33(1 + 20.31/\sqrt{A}) \text{ [MPa]} \quad (3-24)$$

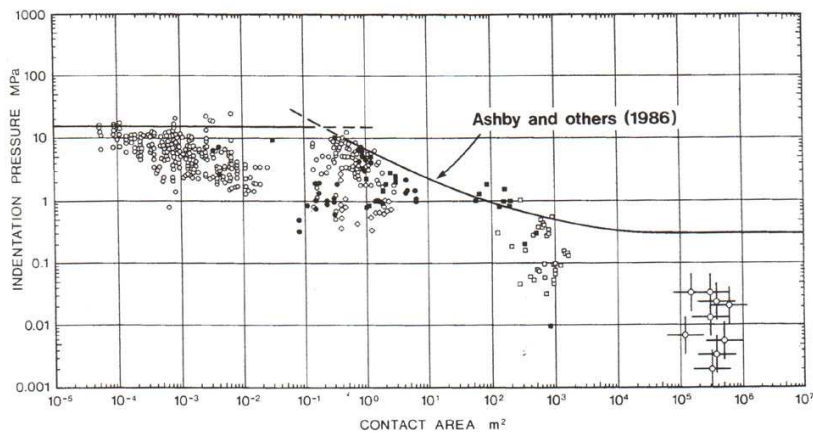


Fig. 3-89 Ashby et al.(1986) design curve for local ice indentation pressure data (Sanderson, 1988)

Frederking(2003)은 Louis S. St Laurent호의 1994년 북극해 운항에서 측정된 충돌 이벤트에서 접촉면적의 가로-세로 형상비(aspect ratio)를 통해 설계면적을 결정하고 이에 따른 빙압력을 계산하였다. Frederking은 확률론적 접근방법을 통해 국부 빙압력(MPa)과 설계면적(m^2)과의 관계를 다음과 같은 추정식으로 제안하였다.

$$P = 7.4 A^{-0.6} \quad \text{for } 0.72m^2 < A < 10m^2 \quad (3-25)$$

여기서는 1년에 1% 초과확률에 대해 국부 빙압력을 계산하였으며, 연중 발생하는

충돌 이벤트 수는 3500개로 추정하였다.

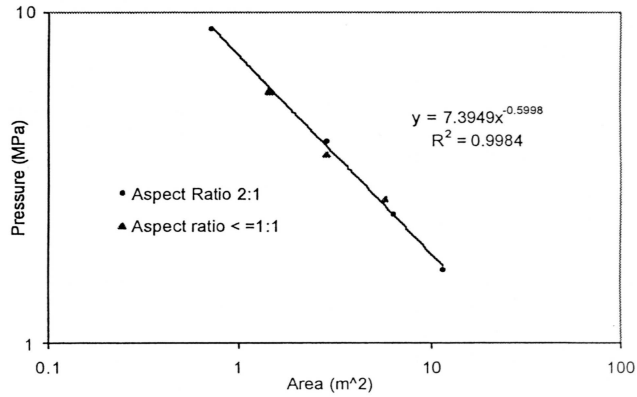


Fig. 3-90 Average Pressure as a function of hull design area for St. Laurent (Frederking, 2003)

한편 Frederking and Johnston(2005)은 캐나다 해안경비대의 쇄빙선 Terry Fox호를 이용해 2001년 Newfoundland 근해에서 선수부에 strain gauge를 설치하여 시험운행 동안 국부 빙압력을 측정하였다. 여기서도 확률론적 접근방법을 통해 1% 초과확률에서 평균 빙압력과 설계면적의 관계를 다음과 같이 추정하였다.

$$P_{av} = 1.48 A^{-0.46} \text{ [MPa]} \quad (3-26)$$

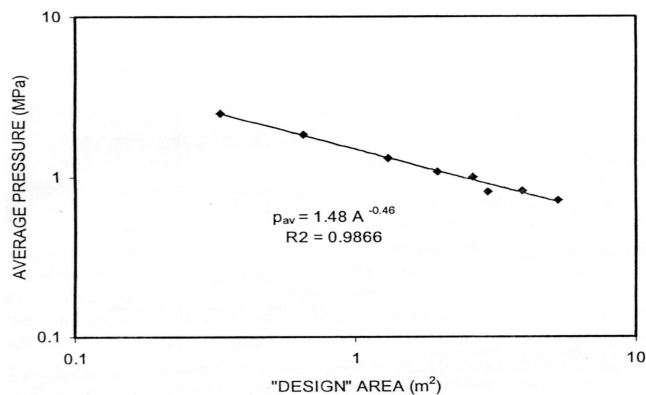


Fig. 3-91 Average pressure vs. design area for Terry Fox bergy bit impact data (Frederking et al., 2005)

또한 같은 방법으로 Frederking(2005)은 1991년 쇄빙선 Oden호의 북극점 시험항해에서 784개의 충돌 이벤트가 기록되었는데, 40개의 패널에서 측정된 평균 빙압력으로부터 1% 초과확률에 대해 다음과 같은 평균 빙압력-설계면적 관계를 얻었다.

$$P_{av} = 7.75 A^{-0.59} \text{ [MPa]} \quad (3-27)$$

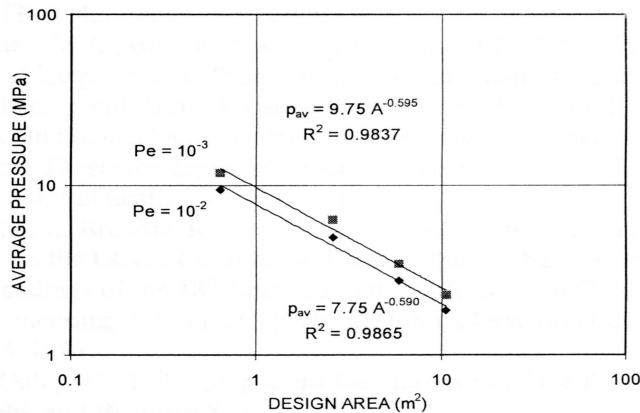


Fig. 3-92 Probability of average ice pressure vs. design area for Oden (Frederking, 2005)

이상으로 실측 빙하중 데이터를 바탕으로 국부 빙압력을 추정하는 경험식에 대하여 모두 정리하였다. Fig. 3-93은 Fig. 3-79를 다시 가져온 것으로 쇄빙선박의 국부 빙압력 자료를 접촉면적의 함수로서 하나의 그래프에 정리한 것이다. 여기서 보면 국부 빙압력과 접촉면적과의 연관성을 파악할 수 있는데, 이는 얼음과의 접촉면적이 증가하면 국부 빙압력은 감소한다는 점이다. Fig. 3-94에는 이렇게 수집된 빙압력 실측자료를 앞서 정리된 몇 가지 국부 빙압력 추정식과 함께 도시하였다. 그림에서 보면 국부 빙압력 추정식의 경우도 전체 빙하중 추정식과 같이 추정식간에 다소 차이가 존재하지만 전체 빙하중만큼 크진 않다. 이는 빙압력 추정식 또한 일부 선박의 빙압력 자료를 바탕으로 추론된 경험식이며, 측정된 자료의 빙상조건, 얼음의 재료특성 등이 다르기 때문으로 판단된다.

본 연구에서는 MV Arctic호와 같은 쇄빙상선 모델에 대해 간단하고 실용적인 형태의 국부 빙압력(MPa) 추정식을 제안하였다 (Fig. 3-95, Fig. 3-96).

$$P = 8.05 A^{-0.31} \quad \text{for } A \leq 1\text{m}^2 \quad (3-28)$$

$$P = 8.09 A^{-0.52} \quad \text{for } A \geq 1\text{m}^2 \quad (3-29)$$

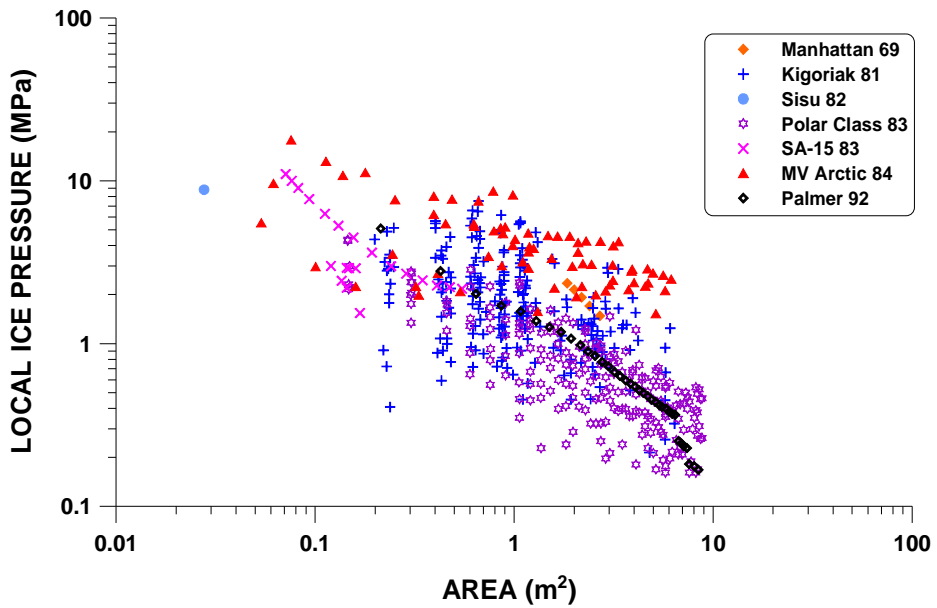


Fig. 3-93 Local ice pressure vs. contact area for seven icebreaking vessels

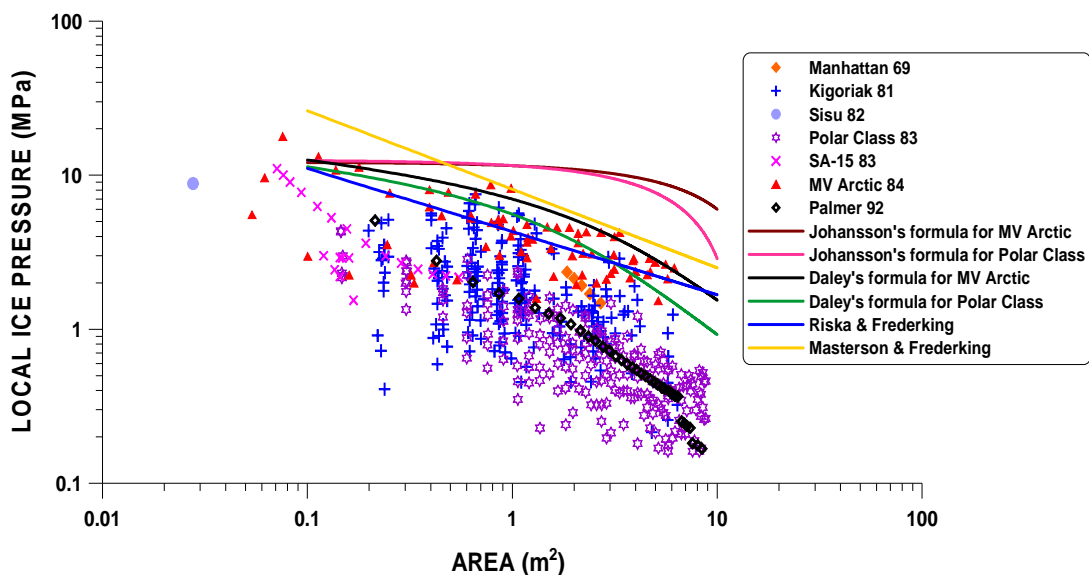


Fig. 3-94 Local ice pressure vs. contact area data and several local ice pressure prediction equations

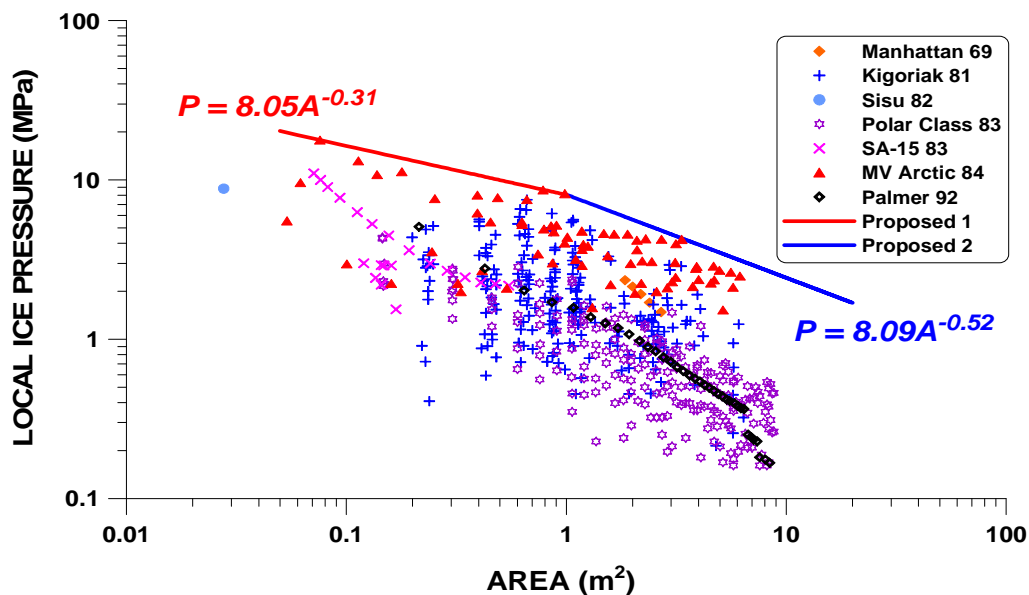


Fig. 3-95 Local ice pressure vs. contact area data and the proposed global ice load prediction equation

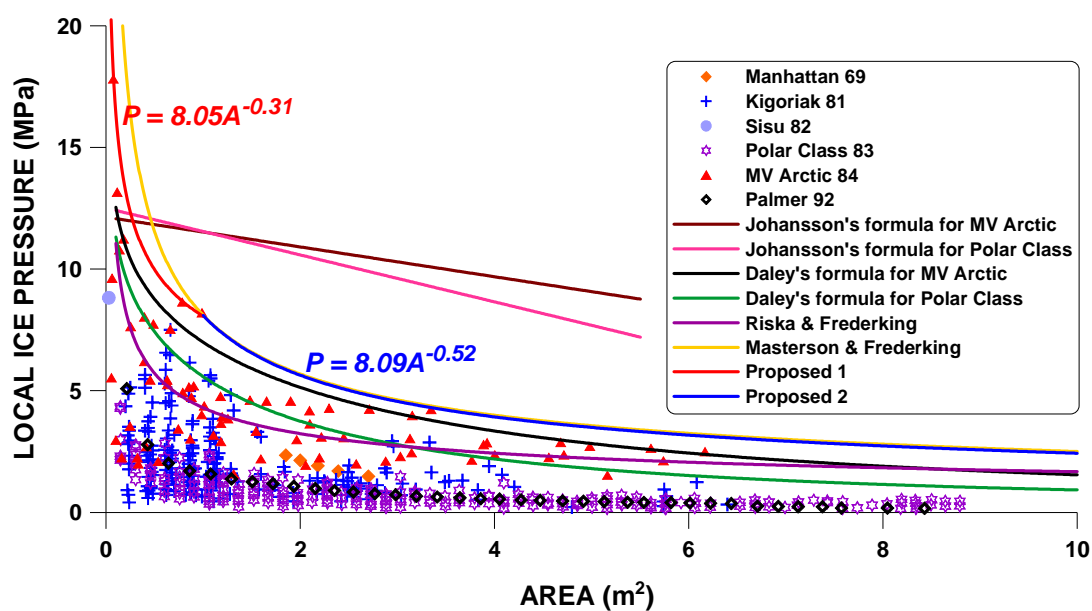


Fig. 3-96 Local ice pressure vs. contact area data in linear scale and the proposed global ice load prediction equations

3.2.3 추정식을 이용한 실선 빙하중 계산 사례

앞서 기 발표된 빙하중 추정식의 의미와 도출배경에 관해 자세히 정리하였다. 본 절에서는 정리된 빙하중 추정 경험식을 바탕으로 실제 건조된 쇄빙선박에 적용시켜 빙해역 항행 시 선박에 작용하는 전체 빙하중과 국부 빙압력을 각각 추정해 보았다. 빙하중 추정식은 동일한 변수(배수량, 엔진출력, 선수각)를 바탕으로 전체 빙하중과 국부 빙압력을 산정할 수 있도록 선정하였으며, 대상 선박의 제원은 Table 3-19와 같다.

Table 3-19 Parameters of icebreaking vessels and icebreaking cargo vessels for ice load estimation

선박 \ 입력변수	Δ (10^3ton)	P (MW)	γ (deg)
<i>Manhattan</i>	115,000	3.6	18
<i>Kigoriak</i>	8,549	12.2	24
<i>MV Arctic</i>	38,104	10.9	30
<i>Polar Sea</i>	13,190	44.8	22.5
<i>Oden</i>	13,000	18.0	22
<i>St. Laurent</i>	12,875	20.1	30
<i>Healy</i>	15,965	22.9	30
<i>SA-15</i>	25,900	15.4	30
<i>Palmer</i>	6,417	8.8	27
<i>Vasily Dinkov</i>	110,000	27	35

우선 Table 3-19에서 제시된 정보를 바탕으로 선박에 작용하는 전체 빙하중과 국부 빙압력을 추정한 결과를 Table 3-20에 함께 정리하였다.

기 발표된 전체 빙하중 추정식의 경우 대부분이 충돌속도의 함수로 표현되므로, 빙해역 항행 시 쇄빙선박의 일반적인 운항속도를 고려해 1m/s, 2m/s, 4m/s로 구분하여 계산하였다. 여기서 CASPPR 96의 경우 전체 빙하중은 선박의 엔진출력과 배수량의 함수로서 선박의 충돌속도에 따른 변화는 없다. Table 3-20에서 보면 전체 빙하중의 경우 추정값은 실측 데이터와는 상당한 차이가 있으며, 추정식간에도 다소 편차가 존재함을 알 수 있다. 특히 선박의 배수량 및 충돌속도가 증가할수록 계산된 전체 빙하중은 실제 빙해역 현장에서 계측되는 값보다 매우 높아 추정값이 상당히 비현실적임을 알 수 있다. 이는 전체 빙하중 추정식이 선박의 특정 변수만을 포함하

고 있기 때문이고 이러한 변수들 간에 지수값의 차이 때문인 것으로 판단된다. 본 연구에서 제안한 추정식(KMU-ARL 07)은 선박의 배수량이 전체 빙하중에 영향을 미치는 정도를 고려했기 때문에 대형 선박에 적용할 경우 여타 추정식보다 상당히 현실적임을 알 수 있다.

국부 빙압력 추정식의 경우 대부분의 연구자들은 빙압력이 선박의 충돌속도나 선박의 크기에 따른 차이가 크지 않다고 보기 때문에 쇄빙과정 시 얼음과의 접촉면적을 고려해 0.25m², 2.0m², 4.0m²로 구분하여 국부 빙압력을 계산하였다. 또한 CASPPR 96의 경우 F_{max} 는 Daley 84(식 3-8)에서 계산된 전체 빙하중 값을 이용하였다. Table 3-20에서 보면 국부 빙압력은 선체와 얼음과의 충돌 시 접촉면적이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있으며, 추정식들 모두 이러한 경향이 확연히 나타남을 알 수 있다. 그리고 제안된 추정식(KMU-ARL 07)의 경우 실측자료를 비교적 잘 대변하고 있음을 알 수 있다.

Table 3-21과 Table 3-22에는 기 발표된 전체 빙하중 추정식과 국부 빙압력 추정식을 정리하였다.

Table 3-20 Calculated global ice loads and local ice pressures of icebreaking vessels and icebreaking cargo vessels for ice load prediction formulas

선박 추경식	Manhattan			Kigoriak			MV Arctic			Polar Sea			Oden			St. Laurent			Healy			SA-15			Palmer			Vasily Dinkov		
	1	2	4	1	2	4	1	2	4	1	2	4	1	2	4	1	2	4	1	2	4	1	2	4	1	2	4	1	2	4
Johansson 81	55	111	221	7	14	28	33	66	132	10	19	39	9	19	38	12	25	50	15	30	61	23	47	94	6	12	24	99	197	394
Tunik 82	15	43	123	3	8	22	7	21	59	4	10	29	4	10	29	4	10	29	4	12	33	6	16	46	2	6	18	15	42	119
Keinonen 83	25	64	166	3	9	23	18	46	119	5	12	32	5	12	30	7	17	45	8	21	54	13	33	84	3	8	21	56	144	373
Daley 84	90	227	572	17	42	105	35	89	225	22	56	141	22	56	142	18	46	117	21	53	133	28	71	178	13	33	83	59	149	375
Daley 86	53	69	90	6	8	11	22	28	37	9	12	16	9	12	15	9	12	15	11	14	18	16	21	27	5	7	9	51	66	87
CASPPR 96	285			44			137			80			65			66			80			107			33			367		
IACS-UR 06	38	76	151	7	13	27	18	36	72	9	18	36	9	18	35	9	18	35	10	20	41	14	28	56	6	11	22	37	73	147
KMU-ARL 07	17	34	68	6	12	24	11	22	44	7	14	29	7	14	28	7	14	28	8	15	31	9	19	37	5	11	21	17	33	67

선박 추경식	Manhattan			Kigoriak			MV Arctic			Polar Sea			Oden			St. Laurent			Healy			SA-15			Palmer			Vasily Dinkov		
	0.25	2.0	4.0	0.25	2.0	4.0	0.25	2.0	4.0	0.25	2.0	4.0	0.25	2.0	4.0	0.25	2.0	4.0	0.25	2.0	4.0	0.25	2.0	4.0	0.25	2.0	4.0	0.25	2.0	4.0
Ashby 86	14	5	4	14	5	4	14	5	4	14	5	4	14	5	4	14	5	4	14	5	4	14	5	4	14	5	4	14	5	4
Riska & Frederking 87	8	3	2	8	3	2	8	3	2	8	3	2	8	3	2	8	3	2	8	3	2	8	3	2	8	3	2	8	3	2
Masterson & Frederking 93	18	5	4	18	5	4	18	5	4	18	5	4	18	5	4	18	5	4	18	5	4	18	5	4	18	5	4	18	5	4
CAS-PPR 96	15	10	8	11	5	8	12	7	5	11	6	4	11	6	4	11	6	4	11	6	4	12	7	5	10	5	3	14	9	7
Frederking 03	17	12	10	13	8	6	15	10	8	14	9	7	14	9	7	13	8	6	13	8	7	14	9	7	12	7	5	16	11	9
Frederking 05	20	14	12	15	10	8	17	12	10	16	11	9	16	11	9	15	10	9	16	11	9	16	11	10	14	10	8	18	13	11
Frederking & Johnston 05	17	5	3	17	5	3	17	5	3	17	5	3	17	5	3	17	5	3	17	5	3	17	5	3	17	5	3	17	5	3
KMU-ARL 07	18	5	3	18	5	3	18	5	3	18	5	3	18	5	3	18	5	3	18	5	3	18	5	3	18	5	3	18	5	3
	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1
	12	6	4	12	6	4	12	6	4	12	6	4	12	6	4	12	6	4	12	6	4	12	6	4	12	6	4	12	6	4

Table 3-21 Summary of global ice load prediction equations

<i>References</i>	<i>Equations</i>	<i>Comparison with Data</i>	<i>Comments</i>
Johansson et al.(1981)	$F_{\max} = V \Delta^{0.9}$ $F_{\max} = 2.5 V \sin \gamma \Delta^{0.9}$	Canmar Kigoriak	Extreme Impact Load (Semi-infinite Ice)
Tunik(1982)	$F_{\max} = 0.65 V^{1.5} \Delta^{2/3}$		
Keinonen (1983)	$F_{\max} = 0.48 V^{1.37} \Delta^{0.9}$	Canmar Kigoriak	
Daley et al. (1984)	$F_{\max} = 8 (V \cos \gamma)^{4/3} \left(\frac{\Delta}{1 + 2.65 \sin \gamma} \right)^{3/5}$	Polar Sea	
Tunik(1985)	$F_{\max} = 0.036 V^{1.3} \Delta^{0.6} \sigma_c^{0.4} S_1 B^{0.4}$ spoon-shaped bow $F_{\max} = 0.027 V^{1.5} \Delta^{0.7} \sigma_c^{0.3} S_2$ wedge-shaped bow		
Daley et al. (1986)	$F_{\max} = 1.132 V^{0.388} \Delta^{0.809}$	MV Arctic	
CASPPR(1996) Glen et al. (1984)	$F_{\max} = 2.6 \Delta^{0.9} [1 + (P_s / \Delta^{2/3})^{1/3}]$		
IACS-UR (2006)	$F_{\max} = 1.6 V \Delta^{2/3}$	Manhattan, MV Arctic, Canmar Kigoriak, Robert LeMeur, Polar Sea	
KMU-ARL (2007)	$F_{\max} = 2.55 V \Delta^{0.4}$	MV Arctic	Operating Condition Ice Load (Finite-size Ice)
White (1970)	$F_V = 0.425 \sigma_f h^2$		
	$F_{\max} = 6.64 V (WR \times \Delta)^{0.845}$		
Daley et al. (1984)	$F_{\max} = 1.29 \rho g h^3 \left\{ \frac{\sigma_f}{\rho g h} \times \frac{V l}{\sqrt{g h}} \right\}^{1.4566}$	Canmar Kigoriak	
Riska(1994)	$F = 0.766 \kappa^{0.4} (\sin \gamma)^{0.2} (\Delta \rho g S)^{0.5} V$	Baltic ships	

Table 3-22 Summary of local ice pressure prediction equations

<i>References</i>	<i>Equations</i>	<i>Comparison with Data</i>	<i>Comments</i>
Johansson et al.(1981)	$P = p_0 - \frac{p_0 - p_r}{A_r} A$ $A_r = [12 F_{\max} + 81]^{1/2} - 9$ $p_0 = 3 + 0.85 (\Delta P_s)^{1/3}$ $p_r = F_{\max} / A_r, F_{\max} = V \Delta^{0.9}$	Canmar Kigoriak	
VTT(1982)	$P = 4.4 A^{-0.5} \quad \text{Canmar Kigoriak}$ $P = 4.57 A^{-0.35} \quad \text{MV Arctic}$	Canmar Kigoriak MV Arctic	
Ashby et al. (1986)	$P = 0.33 (1 + 20.31 / \sqrt{A})$	Field and Lab Indentation Tests	
Riska and Frederking (1987)	$P = 4.3 A^{-0.41}$	MV Arctic	
Sanderson (1988)	$P = c A^{-1/2}$	Field and Lab Indentation Tests	
Masterson and Frederking (1993)	$P = 8.1 A^{-0.572}$	Canmar Kigoriak, MV Arctic, Field Indentation Tests	
CASPPR(1996) Glen et al. (1984)	$P = \frac{F_{\max}}{A} \left[1 - \frac{1}{1.24 \left(\frac{52A}{F_{\max}} \right)^{0.85}} \right]$	Polar Sea	
Frederking (2003)	$P = 7.4 A^{-0.6}$	Louis S. St. Laurent	Probabilistic Model
Frederking and Johnston(2005)	$P = 1.48 A^{-0.46}$	Terry Fox	
Frederking (2005)	$P = 7.75 A^{-0.59}$	Oden	
KMU-ARL (2007)	$P = 8.05 A^{-0.31} \quad \text{for } A \leq 1\text{m}^2$ $P = 8.09 A^{-0.52} \quad \text{for } A \geq 1\text{m}^2$	MV Arctic	

IV. 빙하중 산정 소프트웨어 "IceView"

4.1 개요

3장에서는 기 발표된 빙하중 추정식에 대해 자세히 정리하였다. 4장에서는 70년대부터 근래까지 발표된 빙하중 추정식 중 본 연구에서 개발한 빙하중 산정 프로그램에 내장된 전체 빙하중과 국부 빙압력 추정식을 정리하였다. 이 프로그램은 실제 조선현장에서 선박의 설계 시 빙하중을 보다 쉽고 편리하게 계산하기 위해 개발되었다.

"IceView"는 비주얼베이직을 이용하여 만들어진 GUI 방식의 빙하중/빙저항 산정 소프트웨어다. 이전 "IceView 1.1"에서는 쇄빙선박에 작용하는 빙저항만을 계산하였지만, 이번에 개발된 "IceView 1.2"에서는 빙해역에서 쇄빙선박이 받는 빙저항을 계산하는 모듈과 함께 쇄빙선박에 작용하는 빙하중을 계산하는 모듈이 새롭게 구성되었다. 본 프로그램의 구성과 실행과정에 관한 흐름도는 Fig. 4-1과 같다.

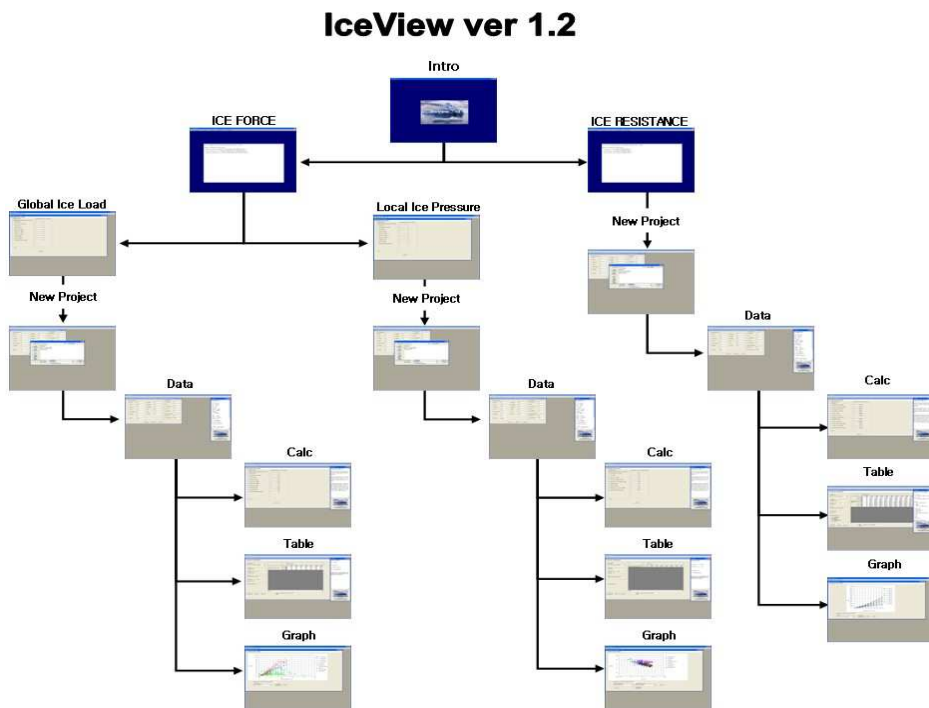


Fig. 4-1 Flowchart of the IceView ver 1.2

"IceView 1.2"는 선박의 선형정보와 얼음의 재료특성으로부터 선박에 작용하는 전체 빙하중과 국부 빙압력을 계산할 수 있도록 구성되었다 (Fig. 4-2). 우선 변수값이 입력 되면 프로그램에 내장된 전체 빙하중과 국부 빙압력 추정식을 통해 빙하중을 쉽고 빠르게 계산할 수 있다 (Fig. 4-3). 또한 추정식에서 사용된 변수값의 변화에 따른 빙하중 추정이 가능하고 계산된 결과값을 테이블로 정리할 수 있으며, 추정값을 그래프상에 도식할 수 있다 (Fig. 4-4, Fig. 4-5, Fig. 4-6 참조). 이와 함께 본 모델에서는 실선 시험운항을 통해 계측된 실측 빙하중 자료를 내장하고 있어 계산된 전체 빙하중과 국부 빙압력 추정값을 실측 빙하중 자료와 비교/분석 할 수 있다.

The screenshot shows the IceView 1.2 software interface. The main window has a menu bar (Input Data, Run, Help, Exit) and a title bar (C:\Program Files\IceView 1.2\NewProject1.txt). The main area is divided into three sections: Ship Parameters, Ice Parameters, and Other Parameters. The Ship Parameters section includes fields for B (m), L (m), V (m/s), T (m), Δ (10³ ton), P (MW), f, and A (m²). The Ice Parameters section includes fields for σ_f (MPa), h (m), ρ_i (ton/m³), h_s (m), σ_c (MPa), and g (m/s²). The Other Parameters section includes a field for ρ_w (ton/m³). The Help window on the right lists various parameters and their units, such as B (m), L (m), V (m/s), T (m), Δ (10³ ton), P (MW), f, A (m²), α (deg), β (deg), γ (deg), C_B, C_P, C_{WP}, C_T, C_{WP}, σ_T (MPa), h_i (m), and ρ_w. The Help window also includes a small image of an ice floe and copyright information for Korea Maritime University Arctic Research Laboratory.

Fig. 4-2 Input parameters of ship and ice to ice load estimation

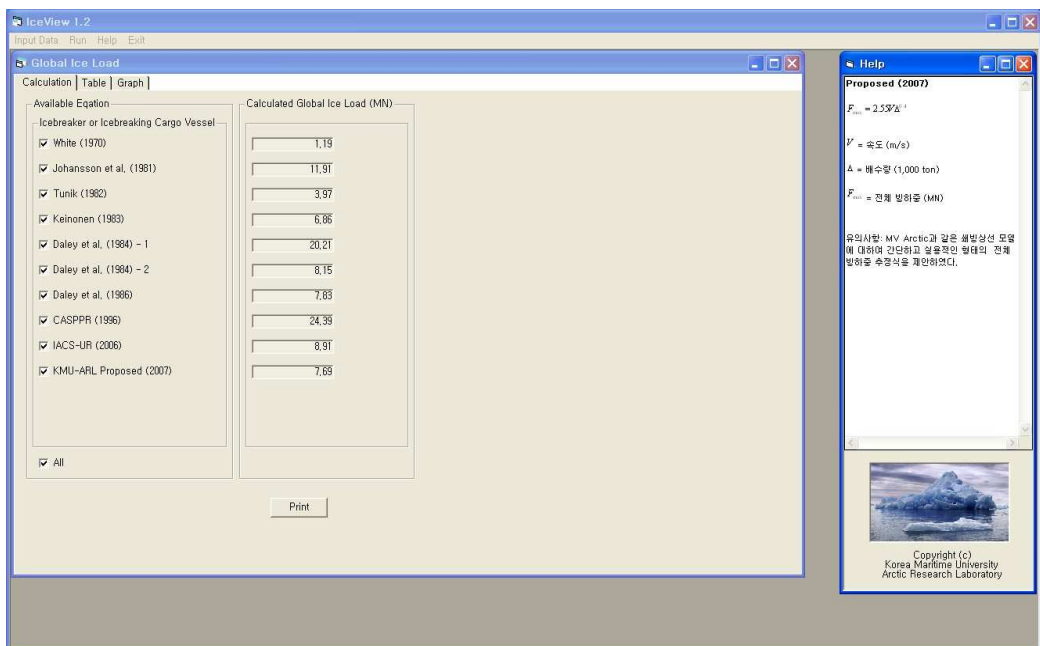


Fig. 4-3 Calculation of global ice loads for selected ice load prediction formulas

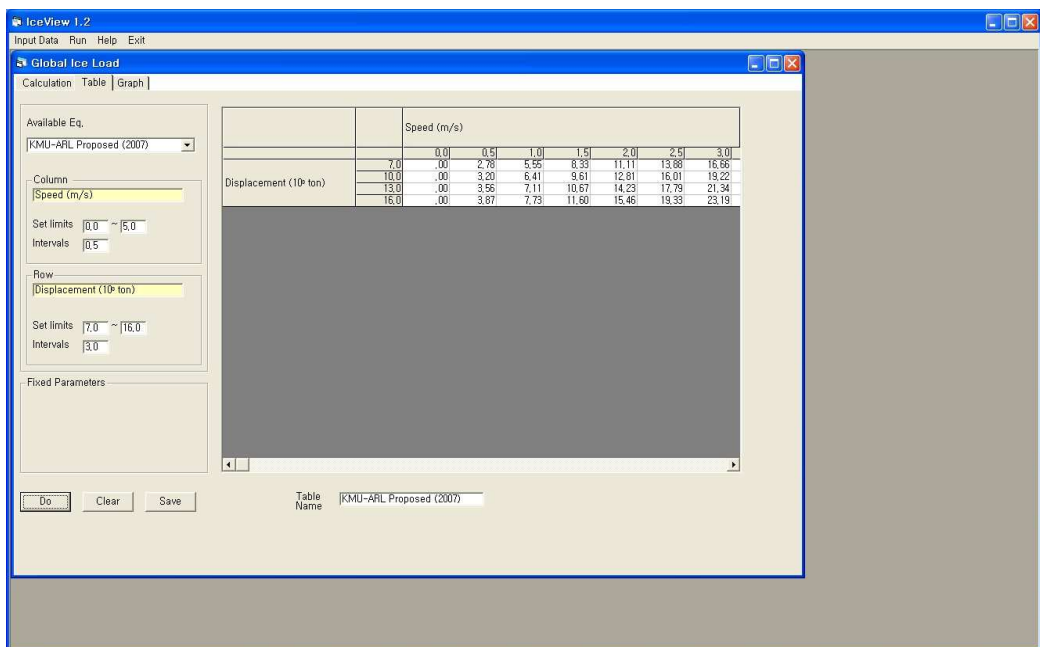


Fig. 4-4 Table of the calculated global ice loads

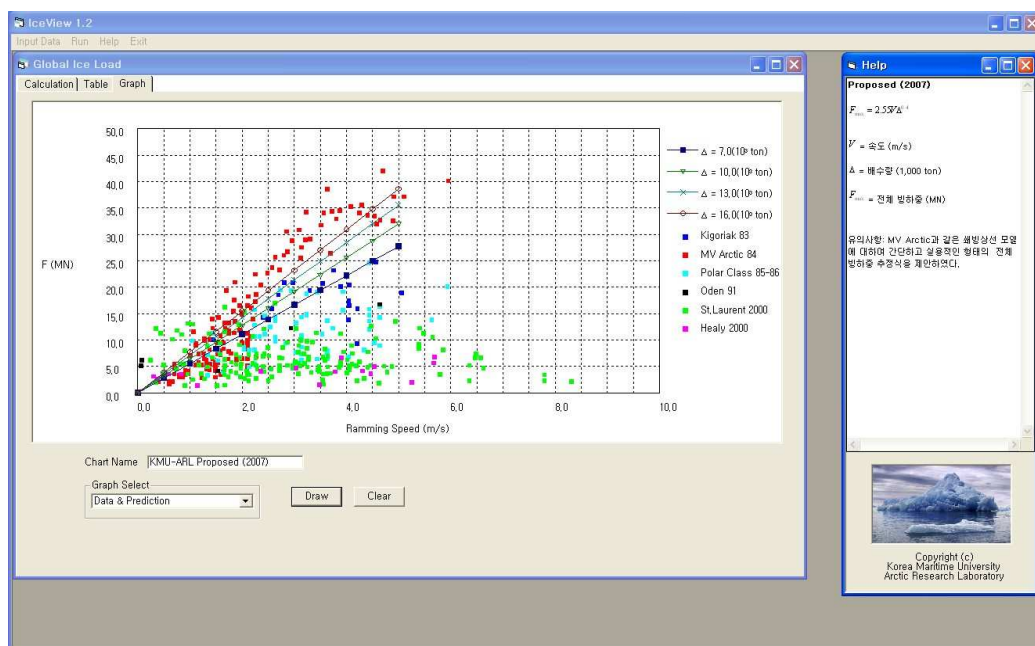


Fig. 4-5 Graph of the calculated global ice loads vs. sea trial data in liner scale

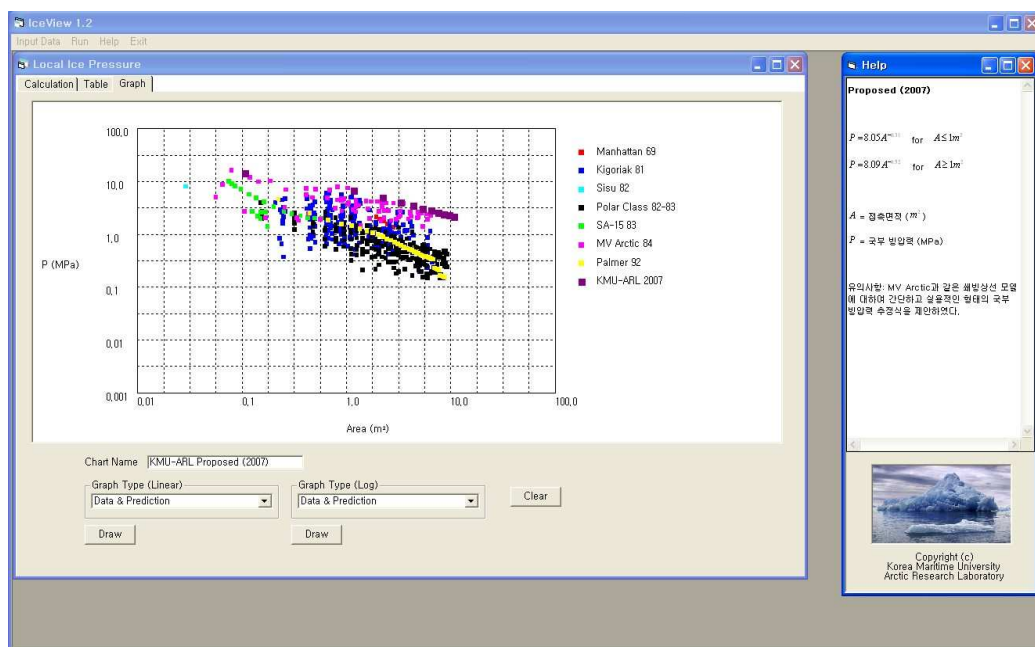


Fig. 4-6 Graph of the calculated local ice pressures vs. sea trial data in log scale

4.2 IceView를 이용한 빙하중 산정

본 절에서는 빙하중 산정 소프트웨어 "IceView 1.2"에 내장된 전체 빙하중 산정식과 국부 빙압력 산정식에 관해 정리하고 이를 통해 선박의 형상과 관련된 변수와 얼음의 재료특성에 관한 변수를 바탕으로 국내 건조 예정인 쇄빙조사선에 대해 빙해역 운항 시 선박에 작용하는 빙하중을 계산해 보았다.

4.2.1 전체 빙하중 산정식

전체 빙하중 추정식의 경우 1970~2007년까지 기 발표된 9개의 추정식과 함께 본 연구에서 제안한 전체 빙하중 추정식(식 3-16)을 추가하여 총 10개의 전체 빙하중 추정식이 포함되었다. 전체 빙하중 추정식의 경우 대부분은 선박의 배수량과 충돌속도에 대한 함수로 표현되어있으며, 얼음의 재료특성, 선수 형상, 선박의 출력 등으로 표현된 식 또한 포함하고 있다.

여기서는 선정된 10개의 전체 빙하중 추정식에 대해 정리하였다.

① White(1970)

$$F_V = 0.425 \sigma_f h^2$$

h = 빙판의 두께 [ft]

σ_f = 얼음의 굽힘강도 [psi]

F_V = 전체 빙하중 [lb]

출전: White, R.M., 1970, "Prediction of Icebreaker Capability," The Royal Institution of Naval Architects, Vol.112, pp.225-251.

유의사항: 평탄빙에서 굽힘파괴를 일으키는 문제를 단순보 이론에 의해 내하중 능력 (bearing capacity)을 계산하여 선박이 받는 빙하중으로 역추정하는 방법이다.

② Johansson et al.(1981)

$$F_{\max} = 2.5 V \sin \gamma \Delta^{0.9}$$

V = 속도 [m/s]

Δ = 배수량 [10^3 ton]

γ = 선수각 [deg]

F_{\max} = 전체 빙하중 [MN]

출전: Johansson, B., Keinonen, A., Mercer, B. and Stubbs, J., 1981, "Technical Development of an Environmentally Safe Arctic Tanker," Proceedings of the Ice Tech 81, SNAME STAR Symposium, Ottawa.

유의사항: 선수부가 무한 얼음에 정면으로 충돌하는 충격쇄빙 상황을 가정한 빙하중 추정식으로 쇄빙선 Canmar Kigoriak(선수각 $\gamma=23^\circ$)호의 실선시험 데이터에 기초하고 있다. 선수각이 다른 일반적인 선형에 대해서도 적용할 수 있도록 경험식이 수정되었다.

③ Tunik(1982)

$$F_{\max} = 0.65 V^{1.5} \Delta^{2/3}$$

V = 속도 [m/s]

Δ = 배수량 [10^3 ton]

F_{\max} = 전체 빙하중 [MN]

출전: Tunik, A.L., 1982, "Ultimate Safe Conditions for Ship's Operation in Ice," Proceedings of SNAME Arctic Section, Calgary.

유의사항: Tunik은 이와는 별도로 충격쇄빙 시 선수부가 받는 극한 빙하중은 선수

각의 차이보다는 선수부의 기하학적 형상에 좌우된다고 보고 spoon-shaped bow와 wedge-shaped bow에 대하여 서로 다른 추정식을 제시한 바 있다.

④ Keinonen(1983)

$$F_{\max} = 0.48 V^{1.37} \Delta^{0.9}$$

V = 속도 [m/s]

Δ = 배수량 [10^3 ton]

F_{\max} = 전체 빙하중 [MN]

출전: Glen, I.F. and Daley, C.G., 1982, "Ice Impact Loads on Ships," Proceedings of SNAME Arctic Section, Calgary.

유의사항: Canmar Kigoriak호의 실선 데이터 분석을 통해 제안된 경험식으로 이 선박과 다른 일반적인 선형에 대해 적용하려면 선속에서 선수각의 영향을 고려해야 한다.

⑤ Daley et al.(1984) - 1

$$F_{\max} = 8 (V \cos \gamma)^{4/3} \left(\frac{\Delta}{1 + 2.65 \sin \gamma} \right)^{3/5}$$

V = 속도 [m/s]

Δ = 배수량 [10^3 ton]

γ = 선수각 [deg]

F_{\max} = 전체 빙하중 [MN]

출전: Daley, C.G., St. John, J.W., Seibold, F. and Bayly, I., 1984, "Analysis

of Extreme Ice Loads Measured on USCGC Polar Sea," Society of Naval Architects and Marine Engineers Transactions, Vol.92, pp.241-252.

유의사항: 빙하중 계산 프로그램 "BAFFIN"과 쇄빙선 Polar Sea의 빙하중 데이터를 이용하여 만든 극한 빙하중 추정식이다.

⑥ Daley et al.(1986)

$$F_{\max} = 1.132 V^{0.388} \Delta^{0.809}$$

V = 속도 [m/s]

Δ = 배수량 [10^3 ton]

F_{\max} = 전체 빙하중 [MN]

출전: Daley, C.G., Phillips, L.D. and McCallum, J.S., 1986, "Dynamic Ship/Ice Impact - Results of Parametric Model Testing," Proceedings of the First International Conference on Ice Technology (ed. T.K.S. Murthy), pp.349-363.

유의사항: 쇄빙상선 MV Arctic호의 모형시험으로부터 얻어진 빙하중 데이터를 실선 규모로 확장시킨 전체 빙하중 추정식으로 속도 12knots까지 적용할 수 있다.

⑦ CASPPR (1996)

$$F_{\max} = 2.6 \Delta^{0.9} [1 + (P_s / \Delta^{2/3})^{1/3}]$$

Δ = 배수량 [10^3 ton]

P_s = 축마력 [MW]

F_{\max} = 전체 빙하중 [MN]

출전: Glen, I.F., Daley, C.G. and Tam, G., 1985, "Analysis of the Structure of the Proposed CCG Polar class 8 Icebreaker under Extreme Ice Loads," Society of Naval Architects and Marine Engineers Transactions, Vol.93, pp.283-301.

유의사항: 1996년 개정된 CASPPR (Canadian Arctic Shipping Pollution Prevention Regulations)에서 사용되고 있는 충격쇄빙 시의 빙하중 추정식이다. CASPPR에서는 축마력과 배수량 사이에 근사적으로 $P_s = 3 \Delta^{2/3}$ 의 관계를 제안하고 있다.

⑧ IACS-UR(2006)

$$F_{\max} = 1.6 V \Delta^{2/3}$$

V = 속도 [m/s]

Δ = 배수량 [10^3 ton]

F_{\max} = 전체 빙하중 [MN]

출전: Dick, R.A., Bell, M.H. and Prior, A., 2006, "A Proposed Icebreaker for Shipping LNG from Canadian Arctic", Proceedings of Ice Tech '06 Symposium, Banff, Canada, Paper No.130-RF.

유의사항: 캐나다의 북극해에서 운항할 목적으로 제시된 Polar class 쇄빙LNG선에 적용할 최대 빙하중 추정식으로 쇄빙선박인 Manhattan, MV Arctic, Canmar Kigoriak, Robert LeMeur, Polar Sea 등 5척의 실선 계측 데이터로부터 유추한 것이다.

⑨ Daley et al.(1984) - 2

$$F_{\max} = 1.29 \rho g h^3 \left(\frac{\sigma_f}{\rho g h} \times \frac{Vl}{\sqrt{gh}} \right)^{1.4566}$$

V = 속도 [m/s]

h = 빙판의 두께 [m]

σ_f = 얼음의 굽힘강도 [MPa]

ρ = 해수의 밀도 [kg/m^3]

g = 중력가속도 [m/s^2]

F_{\max} = 전체 빙하중 [MN]

출전: Daley, C.G., St. John, J.W., Seibold, F. and Bayly, I., 1984, "Analysis of Extreme Ice Loads Measured on USCGC Polar Sea," Society of Naval Architects and Marine Engineers Transactions, Vol.92, pp.241-252.

유의사항: 유한한 크기의 얼음이나 빙판의 두께가 얇은 경우는 전체 빙하중이 빙판의 파괴에 의해 제한된다. l 은 수선면각(waterline half-angle), α 와 플레어각(flare angle from the vertical), β 의 함수로서 Polar Sea의 경우 $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 54^\circ$ 이고 $l = 0.3$ 이다.

⑩ KMU-ARL(Korea Maritime University - Arctic Research Laboratory, 2007)

$$F_{\max} = 2.55 V \Delta^{0.4}$$

V = 속도 [m/s]

Δ = 배수량 [10^3ton]

F_{\max} = 전체 빙하중 [MN]

유의사항 : MV Arctic호와 같은 쇄빙상선 모델에 대하여 간단하고 실용적인 형태의 전체 빙하중 추정식을 제안하였다.

4.2.2 국부 빙압력 산정식

국부 빙압력 추정식의 경우 1981~2007년까지 기 발표된 8개의 추정식과 함께 본 연구에서 제안한 추정식(식 3-28, 3-29)을 추가하여 총 9개의 국부 빙압력 추정식이 포함되었다. 국부 빙압력의 경우 대부분의 추정식은 접촉면적의 함수로 구성되어 있으며, 일부는 전체 빙하중과 선박의 엔진출력, 선박의 배수량 등으로 표현되어 있다.

여기서는 선정된 9개의 국부 빙압력 추정식에 대해 정리하였다.

① Johansson et al.(1981)

$$P = p_0 - \frac{p_0 - p_r}{A_r} A$$

$$A_r = [12 F_{\max} + 81]^{1/2} - 9$$

$$p_0 = 3 + 0.85(\Delta P_s)^{1/3}$$

$$p_r = F_{\max} / A_r$$

$$F_{\max} = V \Delta^{0.9}$$

V = 속도 [m/s]

Δ = 배수량 [10^3 ton]

P_s = 선박의 축마력 [MW]

F_{\max} = 전체 빙하중 [MN]

A = 접촉면적 [m^2]

P = 국부 빙압력 [MPa]

p_r = 기준 압력[reference pressure, MPa]

A_r = 기준 면적[reference contact area, m^2]

출전: Johansson, B., Keinonen, A., Mercer, B. and Stubbs, J., 1981, "Technical Development of an Environmentally Safe Arctic Tanker," Proceedings of the Ice Tech 81, SNAME STAR Symposium, Ottawa.

유의사항: Canmar Kigoriak호의 데이터를 바탕으로 국부 빙압력의 극한값을 추정하는 식이다.

② VTT(1982)

$$P = 4.57 A^{-0.35}$$

A = 접촉면적 [m^2]

P = 국부 빙압력 [MPa]

출전: Technical Research Center of Finland, 1982, Assessment of Strengths of the Bow Structure of the MV Arctic under Ice Loads Caused by Multi Year Ice, Report to Canadian Coast Guard.

유의사항: VTT(Technical Research Center of Finland)에서는 캐나다의 의뢰를 받아 쇄빙상선 MV Arctic호의 빙하중 계측장치를 개발했는데, 이 때 제시된 국부 빙압력 추정식이다.

③ CASPPR(1996)

$$P = \frac{F_{max}}{A} \left[1 - \frac{1}{1.24 \left(\frac{52A}{F_{max}} \right)^{0.85}} \right]$$

A = 접촉면적 [m^2]

F_{max} = 전체 빙하중 [MN]

P = 국부 빙압력 [MPa]

출전: Glen, I.F., Daley, C.G. and Tam, G., 1985, "Analysis of the Structure of the Proposed CCG Polar class 8 Icebreaker under Extreme Ice Loads," Society

of Naval Architects and Marine Engineers Transactions, Vol.93, pp.283-301.

유의사항: 1996년 개정된 캐나다 빙등급 선급규정인 CASPPR (Canadian Arctic Shipping Pollution Prevention Regulations)에서 사용되고 있는 국부 빙압력 추정식으로 Daley et al.(1984)가 제안한 전체 빙하중 F_{\max} 를 이용한다.

④ Riska and Frederking(1987)

$$P = 4.3 A^{-0.41}$$

A = 접촉면적 [m^2]

P = 국부 빙압력 [MPa]

출전: Riska, K. and Frederking, R, 1987, Modelling Ice Load during Penetration into Ice - Ice Load Penetration Model Report 2, Joint Research Project, NRC and TRC of Finland, Espoo.

유의사항: 캐나다의 NRC와 핀란드의 VTT의 공동연구로 MV Arctic호의 다년생빙 데이터를 분석하여 얻어진 국부 빙압력 추정식이다.

⑤ Masterson and Frederking(1993)

$$P = 8.1 A^{-0.572} \quad \text{for } A \leq 19\text{m}^2$$

A = 접촉면적 [m^2]

P = 국부 빙압력 [MPa]

출전: Masterson, D.M. and Frederking, R.M.W., 1993, "Local Contact Pressures in Ship/Ice and Structure/Ice Interactions," Cold Regions Science and Technology, Vol.21, pp.169-185.

유의사항: 쇄빙선박 Canmar Kigoriak, MV Arctic호의 실선 빙압력 데이터, 그리고 빙해역 현장 빙압력 데이터(Pond Inlet, Hobson's Choice, Resolute Flatjack Tests)를 빙압력-접촉면적 그래프로 정리하였는데 모든 데이터의 평균값으로부터 표준편차의 2배 떨어진 값을 나타낸 식이다. 이 식은 $P = 8.1 A^{-0.5}$ 의 형태로 현재 API와 CSA코드에서 사용되고 있다.

⑥ Ashby et al.(1986)

$$P = 0.33(1 + 20.31/\sqrt{A})$$

A = 접촉면적 [m^2]

P = 국부 빙압력 [MPa]

출전: Ashby, M.F. et al., 1986, "Nonsimultaneous Failure and Ice Loads on Arctic Structures", Offshore Technology Conference Paper No. OTC 5127, pp.399-404.

유의사항: Sanderson의 빙압력-접촉면적 관계식에 사용된 해양구조물 빙압력 데이터에 맞추어 제안된 추정식이다. 얼음의 압축파괴에 필요한 최대 압력을 15MPa로 가정하고 있다.

⑦ Frederking(2003)

$$P = 7.4 A^{-0.6}$$

A = 접촉면적 [m^2]

P = 국부 빙압력 [MPa]

출전: Frederking, R.M.W., 2003, "Determination of Local Ice Pressures from Ship Transits in Ice", Proceedings of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, pp.484-488.

유의사항: 쇄빙선 Louis S. St. Laurent호의 빙압력 실측 데이터를 이용, 확률 분석

을 통해 얻어진 빙압력 추정식이다.

⑧ Frederking and Johnston(2005)

$$P = 1.48 A^{-0.46}$$

A = 접촉면적 [m^2]

P = 국부 빙압력 [MPa]

출전: Frederking, R., 2005, "Local Ice Pressures on the CCGS Terry Fox", Proceedings of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul, Korea, pp.718-723.

유의사항: 쇄빙선 Terry Fox호의 빙압력 실측 데이터를 이용, 확률 분석을 통해 얻어진 빙압력 추정식이다.

⑨ KMU-ARL(Korea Maritime University - Arctic Research Laboratory, 2007)

$$P = 8.05 A^{-0.31} \quad \text{for } A \leq 1\text{m}^2$$

$$P = 8.09 A^{-0.52} \quad \text{for } A \geq 1\text{m}^2$$

A = 접촉면적 [m^2]

P = 국부 빙압력 [MPa]

유의사항 : MV Arctic호와 같은 쇄빙상선 모델에 대하여 간단하고 실용적인 형태의 국부 빙압력 추정식을 제안하였다.

4.2.3 IceView를 이용한 빙하중 산정 예

언급한 바와 같이 "IceView 1.2"는 선박의 제원과 함께 빙해역 빙상정보로부터 선박에 작용하는 빙하중을 계산할 수 있다. 여기서는 현재 해양수산부가 건조 예정인 7000톤급 쇄빙조사선 아라온(ARAON)을 대상으로 추정식별 전체 빙하중과 국부 빙압력을 미리 계산해 보았다. 쇄빙조사선은 극지역에서의 연구 활동 및 극지기지의 물자수송이 주된 목적으로 설계되었으며, 제원은 Table 4-1과 같다.

Table 4-1 Dimension of the icebreaking research vessel

선박 제원	길이(Length)	L_{pp} (m)	95.0
	폭(Moulded Breadth)	B (m)	19.0
	흘수(Draft)	d (m)	6.8
	배수량(Displacement)	Δ (tons)	7,520
선박 성능	기관출력(Engine Power)	MW	10.0
선수 형상	선수각(Stem Angle)	γ (deg)	34

전체 빙하중과 국부 빙압력 산정 시 얼음의 굽힘강도는 0.5MPa이고, 두께가 1.2m인 빙상조건에 대해 선박의 충돌속도(1m/s, 2m/s, 4m/s)와 얼음과의 접촉면적(0.25m², 2.0m², 4.0m²)에 따른 빙하중을 계산하였다 (Table 4-2, Table 4-3).

Table 4-2를 보면 White (70)와 CASPPR (96)의 빙하중 추정식 경우 전체 빙하중 결과는 속도와 상관없이 일정함을 알 수 있다. 이는 White의 경우 전체 빙하중 추정식은 얼음의 굽힘강도와 두께의 함수이고 CASPPR은 선박의 배수량과 엔진출력의 함수이기 때문이다. 또한 전체 빙하중의 경우 추정식간에는 다소 편차가 존재하지만, 국부 빙압력의 추정된 결과는 서로 유사한 경향을 가지고 있음을 알 수 있다 (Table 4-3).

본 연구에서 제안한 빙하중 추정식 KMU-ARL(07)을 통해 쇄빙조사선에 작용하는 빙하중을 추정한 결과 전체 빙하중은 극한 빙하중으로서 선박의 충돌속도에 따라 5.7~22.9MN 정도이고 이는 IACS-UR(06)의 추정치와 비슷한 수치임을 알 수 있다. 또한 접촉면적에 따른 국부 빙압력의 범위는 3.9~12.4MPa 정도로서, 이는 Sanderson(1988)이 정리한 얼음의 규모에 따른 빙압력 실측 데이터를 바탕으로 추론된 Ashby et al. (86)와 캐나다 빙해역 선급규정인 CASPPR (96)의 추정치와 유사함을 알 수 있다.

여기서 쇄빙조사선의 빙하중 실측 데이터가 없기 때문에 추정값과의 직접적인 비교는 다루지 않았다.

Table 4-2 Calculation of the global ice loads [MN] for ship's speeds

추정식 \ 충돌속도	1m/s	2m/s	4m/s
<i>White (70)</i>	1.19	1.19	1.19
<i>Johansson et al. (81)</i>	8.59	17.18	34.37
<i>Tunik (82)</i>	2.49	7.06	19.96
<i>Keinonen (83)</i>	4.82	12.46	32.21
<i>Daley et al. (84)-①</i>	12.12	30.53	76.94
<i>Daley et al. (84)-②</i>	6.25	17.15	47.07
<i>Daley et al. (86)</i>	5.79	7.58	9.92
<i>CASPPR (96)</i>	37.97	37.97	37.97
<i>IACS-UR (06)</i>	6.14	12.28	24.57
<i>KMU-ARL (07)</i>	5.72	11.43	22.86

Table 4-3 Calculation of the local ice pressures [MPa] for contact areas

추정식 \ 접촉면적		0.25m ²	2.0m ²	4.0m ²
<i>Johansson et al. (81)</i>	1m/s	6.24	3.80	1.01
	2m/s	6.40	5.09	3.59
	4m/s	6.49	5.78	4.96
<i>VTT (82)</i>		7.42	3.59	2.81
<i>Ashby et al. (86)</i>		13.73	5.07	3.68
<i>Riska & Frederking (87)</i>		7.59	3.24	2.44
<i>Masterson & Frederking (93)</i>		17.90	5.45	3.67
<i>CASPPR (96)</i>	1m/s	9.90	4.47	2.76
	2m/s	12.07	6.97	5.09
	4m/s	14.26	9.33	7.58
<i>Frederking (03)</i>		17.00	4.88	3.22
<i>Frederking & Johnston (05)</i>		2.80	1.08	0.78
<i>KMU-ARL (07)</i>		12.37	5.64	3.93

V. 빙해역 항행 모델

5.1 북극해 항로 항행 모델링

북극해 항로(Northern Sea Route, NSR)는 러시아의 북쪽 북극해 연안을 따라 무르만스크(Murmansk)에서 베링해협(Bering Strait)을 연결하는 해상수송로를 말한다 (Fig. 5-1). 이 구간은 총 5,400km 정도로서 수에즈 운하나 파나마 운하를 통과하는 기존의 남쪽항로보다 항행거리가 단축되어 많은 이점을 가지고 있다. 북극해 항로는 최근에 동아시아와 대서양의 서유럽을 연결하는 최단항로로서 범세계적인 무역루트로 활용되고 있는 추세이다.

북극해 항로의 경우 연중 두 달 정도를 제외하고는 대부분의 해역이 얼음으로 뒤 덮혀있어 선박의 항행에 많은 어려움을 준다. 이러한 상황에서도 북극해 항로에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있는 이유는 러시아의 북극권에 막대한 양의 천연자원이 매장되어 있기 때문이다. 또한 우리나라와 가까운 오호츠크해의 사할린 지역에는 석유와 천연가스가 대규모로 매장되어 있어서 이들 자원을 개발하고 수송하기 위해 빙해역을 통한 항로가 필수적이며, 이로 인한 경제적 효과는 매우 크다고 할 수 있다 (Ostreng et al. 1999).

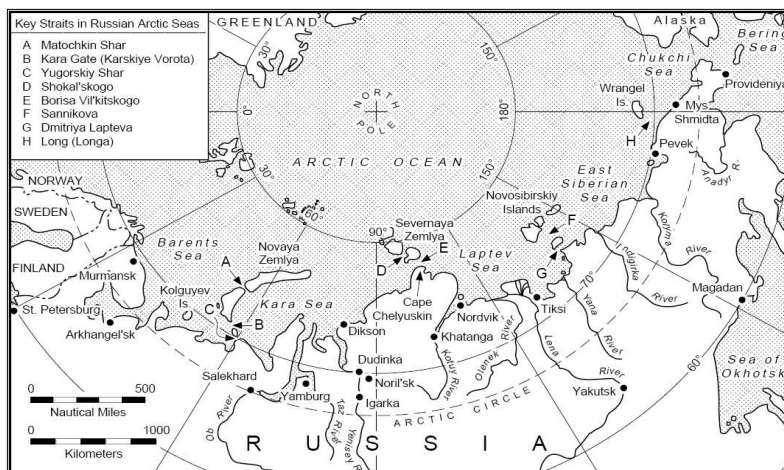


Fig. 5-1 Northern Sea Route (NSR)

쇄빙선박을 이용한 항행에 있어 여러 기술적 어려움 중의 하나는 현재 북극해 지역의 빙상환경과 선박의 통항 항로에 대한 분석이다. 이는 북극해의 다양한 빙상환경에 따라 필연적으로 선택될 수밖에 없는 다양한 항로의 가능성이 존재하기 때문이다 (Fig. 5-2).

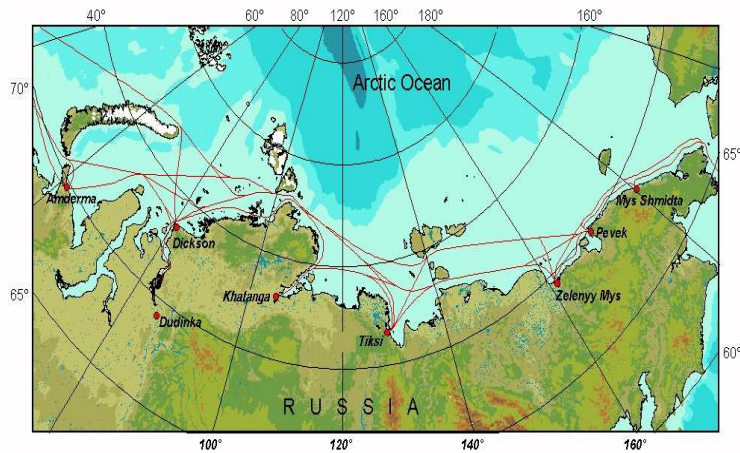


Fig. 5-2 Various sea route of the Northern Sea Route

5장에서는 이러한 잠재적 가능성을 지닌 북극해 항로를 구성하는 다수의 항로로부터 경제적인 요건을 만족하는 최적 운항항로를 선정하기 위한 방법으로 빙해역 항행 모델 (ice transit model)을 다루었다. 또한 이 결과를 상용 GIS 프로그램인 ArcGIS (ESRI 2004)를 이용해 선정된 최적항로를 지도상에 나타냄으로써 북극해 항로 수요자들이 항로 정보를 보다 쉽게 파악할 수 있도록 하였다.

5.2 Ice Transit Model

Ice Transit Model은 무르만스크에서 베링해협까지를 연결하는 항로에 대해 항행선박의 종류, 항행시기, 항행방향 등과 같은 기본적인 정보로부터 항행 시뮬레이션을 통해 이 구간을 운항하는 쇄빙선박의 예상되는 총 소요시간 및 항행거리, 평균속도 그리고 유도쇄빙선의 사용시간, 소요경비 등을 계산하는 프로그램으로서 FORTRAN을 이용해 개발되었다.

본 모델에서는 북극해 항로의 각 구간에 절점(노드, Node)을 배치시켜 각 절점들에

전체 항로를 구성하는 데이터 노드(data node)와 결정 노드(decision node)에는 각각의 환경정보가 입력되어 있어 그 성격이 유사해 보이지만 구성된 형태는 서로 다르다. 데이터 노드는 각 결정 노드를 연결하는 여러 개의 절점을 말한다. 이와 달리 결정 노드는 시뮬레이션 과정에서 항행방향을 선택할 수 있어 데이터 노드에서 또 다른 데이터 노드로 진행시 어떠한 항로가 선택 가능한지 정보를 제공하게 된다. 본 연구에서 선택한 각 절점의 위치는 Fig. 5-3에서와 같이 Mulherin et al.(1996)의 자료를 이용하였다.

이처럼 Ice Transit Model은 쇄빙선박의 제원과 항행시기, 화물의 운송 특성 정보를 입력하여 항로별 소요시간, 소요경비를 계산하고 항로별 빙상조건(해빙의 분포 및 이동 특성, 강도특성 등)의 D/B 구축을 통하여 운항에 적합한 쇄빙선박의 크기와 선박의 특성을 추정할 수 있으며, 이용 가능한 항로를 연결하는 절점에 대한 항로별 정보를 이용하여 최적 운항항로를 결정한다.

본 모델에서 항로를 구간을 구성하는 각 절점의 위치를 Table 5-1에 정리하였다. 여기서 전체항로는 총 59개의 절점으로서, 14개의 결정 노드와 45개의 데이터 노드로 구성되어 있다.

Table 5-1 Node data of the Northern Sea Route

<i>Node Type</i>	<i>Transit segment</i>	<i>Geographic location</i>	<i>Latitude (deg min)</i>	<i>Longitude (deg min)</i>
Data node 1	1-0	Murmansk	69 24	34 26
Decision node 0		Mouth of Kolskiy Gulf	69 57	35 43
Data node 1A	0-2A		72 30	40 00
Data node 2	0-2A		74 13	50 57
Data node 5	0-2A		75 55	56 30
Decision node 2A		Cape Zhelaniya	77 39	71 46
Data node 6	2A-3B		78 04	73 20
Data node 7	2A-3B	Cape Arkticheskiy	80 27	87 07
Decision node 3B			82 06	95 19
Data node 18	3B-6B		81 08	113 37
Data node 19	3B-6B		78 30	130 00

Decision node 6B		Zemlya Bunge	76 46	140 54
Data node 27	6B-7		75 36	150 20
Data node 28	6B-7		74 44	161 37
Data node 29	6B-7		71 36	172 48
Decision node 7		Longa Strait	70 11	177 03
Data node 37	7-8		68 36	182 36
Data node 38	7-8		67 32	187 44
Decision node 8		Bering Strait	66 41	189 03
Data node 3	0-2		70 30	40 00
Data node 4	0-2		71 10	50 43
Decision node 2		Kara Gate & Yugorskiy Shar	70 13	56 09
Data node 15	2-4		71 40	65 52
Data node 16	2-4		73 12	76 32
Data node 3	2-4	Dikson	73 21	81 21
Data node 11	2-4		75 47	90 43
Decision node 4		Vil'kitskiy & Shokal'skogo Straits	77 42	103 26
Data node 13	4-23		77 39	108 38
Decision node 23		Taymyr Peninsula	76 10	117 29
Data node 24	23-5		75 22	122 09
Decision node 5		Tiksi	74 00	130 00
Data node 26	5-6		72 56	135 03
Decision node 6		Drnitiya Lapteva	72 39	141 38
Data node 33	6-7		73 52	146 12
Data node 34	6-7		72 32	153 38
Data node 35	6-7		72 06	165 55
Data node 36	6-7		71 14	171 46
Data node 14	2-3A		71 37	62 23
Data node 17	2-3A		73 37	71 16
Decision node 3A		Mid Kara Sea	74 11	74 42
Data node 8	3A-3B		78 36	77 53
Data node 9	3A-3B		79 44	86 59
Data node 20	3B-5		80 02	112 29
Data node 21	3B-5		77 20	120 55

Data node 22	3B-5		75 58	125 55
Data node 25	5-6A		73 26	135 12
Decision node 6A		Sannikova Strait	74 13	140 58
Data node 30	6A-7		73 23	151 10
Data node 31	6A-7		73 12	160 23
Data node 32	6A-7		71 34	170 37
Data node 10	3A-4		76 12	86 28
Data node 12	3A-4		77 06	94 28
Data node 39	4-6B		77 54	122 53
Data node 40	4-6B		77 29	127 43
Data node 41	4-6B		76 59	132 13
Data node F1	23-5		74 00	114 00
Decision node F2		Indigirka River	73 00	148 00
Data node F3	F2-8		71 00	162 00
Data node F4	F2-8		69 30	178 00

5.2.1 빙해역 항행 시뮬레이션

본 연구에서 개발한 북극해 항로 항행 모델은 북극해 지역을 운항하는 쇄빙상선의 항행 시기별 최적 운항항로를 선정하기 위한 수치 시뮬레이션 모델이다. 이는 각 절점의 환경정보를 바탕으로 쇄빙상선의 최적 운항항로를 선정한 뒤 선정된 최적 운항항로에 대한 선박별 총 항행거리, 소요시간, 평균속도, 유도쇄빙선의 사용시간, 소요경비를 계산하게 된다.

빙해역 항행 모델(Ice Transit Model)은 선박의 종류와 함께 항행방향 및 항행시기를 입력하고 나면 항행 시뮬레이션이 실행된다. 여기서 대상선박은 Norilsk class, Lunni class, Streckalovsky class, Vasily Dinkov 네 가지로 선정하였으며, 이는 차후 프로그램의 실행에 있어서 다른 쇄빙선박에 대한 자료를 입력하면 위와 같은 시뮬레이션 과정이 실행되도록 구성되어있다. 항행방향은 베링해협에서 무르만스크, 무르만스크에서 베링해협으로 구분할 수 있도록 구성하였으며, 항행 시기는 북극해 항로의 빙상환경을 고려해 빙상조건이 보다 온화한 4월, 6월, 8월, 10월로 선정하였다.

항행 시뮬레이션에서 중요한 사항 중 하나는 선속의 결정인데, 이는 가시성과 조종성

을 저해하는 안개나 눈 폭풍 그리고 상부 구조물의 착빙과 같은 현상들에 의해 영향을 받으므로 이를 고려하여 선속을 결정해야 한다. 하지만 빙해역 운항 시 선속에 결정적인 변수로 작용하는 것은 해빙의 상태이다. 본 모델에서는 해빙의 집적도와 두께에 따른 선속의 결정과 함께 해빙의 집적도와 파고, 풍향에 따라 선속을 결정 한 후 계산된 선속값에 기존 항로에 대한 보정을 위해 일정한 보정계수를 곱하여 선속값을 보정한 후 유도쇄빙선의 사용시간과 더불어 평균 항행속도와 함께 이동한 각 구간별 항로거리를 계산하여 소요된 시간을 계산하고 이를 통해 총 소요비용을 계산하는 형태로 구성되어 있다. (Table 5-2, Table 5-3, Table 5-4 참조)

항행 시뮬레이션 과정을 살펴보면 선박은 각 절점을 통과하며 진행하게 되는데 항로를 구성하는 각 구간이 항행에 있어 모두 사용되는 것이 아니다. 그 이유는 항행시기에 따라 해빙의 생성과 분포, 크기 및 집적도가 다르기 때문이고 이로 인해 선박의 항행에 있어서 사용되지 않는 항로구간이 존재하며, 이 구간에 대한 파악이 필요하다. 그러므로 사용되지 않는 항로구간을 사전에 미리 파악하면 빙해역에서의 항행에 있어 그만큼의 시간적, 경제적 손실을 줄일 수 있다. 본 항행 모델에서는 북극해 지역에서 조사된 자료를 바탕으로 항행시기를 파악하고 시뮬레이션 실행에 앞서 4월과 6월, 8월과 10월에서 사용되지 않는 항로구간을 파악하여 이를 고려해 프로그래밍 하였다.

시뮬레이션을 실행하기 위해서는 기본적으로 선박의 제원, 항행방향, 항행시기에 대한 정보를 입력해야한다. 이러한 정보가 입력되고 나면 시뮬레이션이 실행되며 각 항로구간의 결정 노드에서는 데이터 노드의 해빙의 집적도와 두께, 파고, 풍향에 대한 정보를 비교/분석하여 선박이 보다 항행하기 좋은 조건의 데이터 노드를 선택해 진행하게 되고, 이러한 과정을 반복해 나가며 다수의 반복실행을 통해 최종적으로 쇄빙상선의 최적 운항항로를 선정하는 알고리즘으로 개발하였다. 항행 시뮬레이션 과정에서 사용된 선박의 제원은 다음과 같다.

1) Norilsk class : Multi-purpose cargo ship

선박 제원	전체길이(length overall)	174m
	최대흘수(maximum draft)	10.5m
	재화중량(deadweight)	19,950ton
선박 성능	기관출력(engine power)	20,600hp
	쇄빙능력(icebreaking capacity)	1m 두께의 빙해역에서 2knot
기타 정보	건조사(builder)	Wartsila, Finland 1982
	선주(ship owner)	Russia

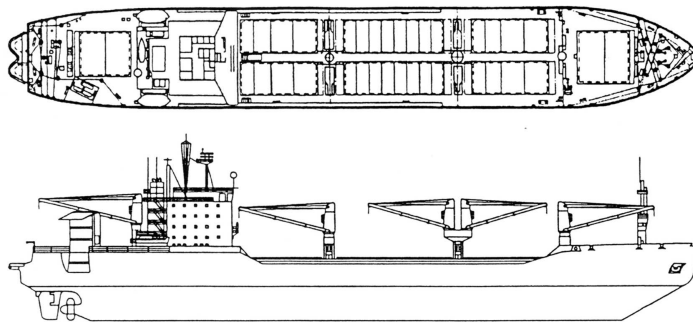


Fig. 5-4 Russian Norilsk-class SA-15 multipurpose icebreaking cargo ship (Mulherin et al. 1996)

2) Lunni class : Liquid bulk carrier

선박 제원	전체길이(length overall)	164.5m
	최대흘수(maximum draft)	9.5m
	재화중량(deadweight)	16,000ton
선박 성능	기관출력(engine power)	15,400hp
	쇄빙능력(icebreaking capacity)	1m 두께의 빙해역에서 2knot
기타 정보	건조사(builder)	Kvaerner Masa-Yards, Finland 1976
	선주(ship owner)	Finland

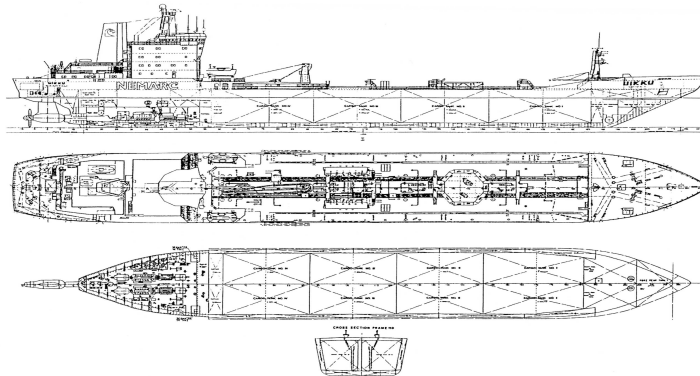


Fig. 5-5 Finnish Lunni-class liquid bulk carrier (Mulherin et al. 1996)

3) Strekalovsky class : Dry bulk carrier

선박 제원	전체길이(length overall)	162.1m
	최대흘수(maximum draft)	9.9m
	재화중량(deadweight)	19,252ton
선박 성능	기관출력(engine power)	11,050hp
기타 정보	건조사(builder)	Germany 1981
	선주(ship owner)	Russia

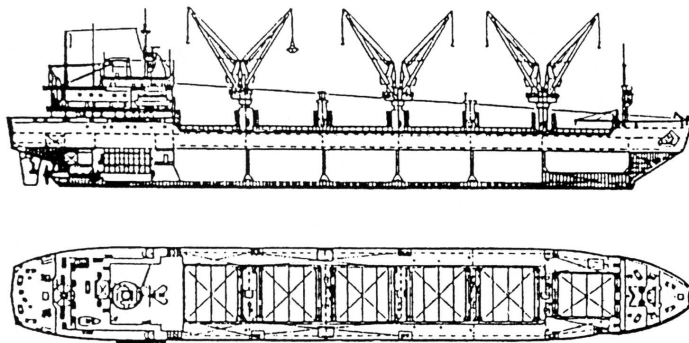


Fig. 5-6 Russian Strekalovsky-class dry bulk carrier (Mulherin et al. 1996)

4) Vasily Dinkov : Icebreaking crude oil tanker

선박 제원	전체길이(length overall)	256m
	재화중량(deadweight)	70,000ton
선박 성능	기관출력(engine power)	27MW
	쇄빙능력(icebreaking capacity)	1.6m 두께의 빙해역에서 2.8knot
기타 정보	건조사(builder)	Samsung Heavy Industries Co., Ltd., Korea 2007
	선주(ship owner)	Russia

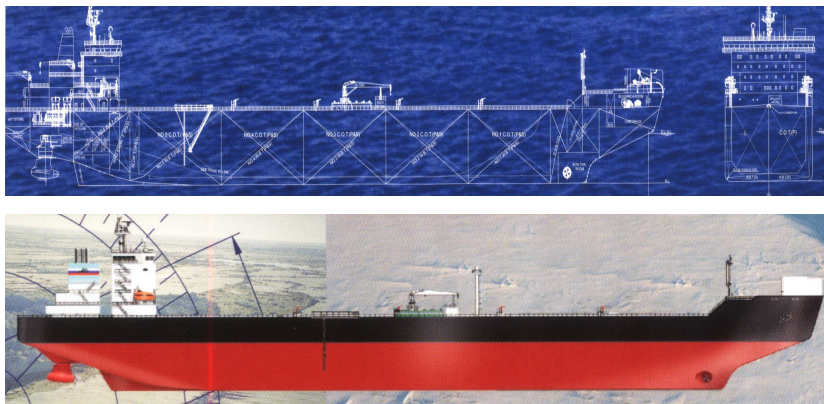


Fig. 5-7 Russian Vasily Dinkov arctic commercial tanker

선속의 결정은 시뮬레이션 과정 중에서 가장 중요한 사항이다. 일반적으로 선속은 파도와 해류, 바람과 같이 조종성에 영향을 주는 요인과 함께 어둠과 안개처럼 가시성에 영향을 주는 요인으로 구성되어 있으며, 이러한 여러 가지 환경적인 요인에 의해 지속적으로 영향을 받는다.

빙해역에서는 이들 보다 해빙의 크기와 분포에 따라 선박의 진행방향 및 선속을 유지하기 위한 속도 그리고 유도쇄빙선의 사용이 필요한지에 대한 여부를 결정할 수 있다. 본 항행 모델에서는 풍향, 파도와 해빙의 두께 및 집적도에 관한 정보를 중점적으로 하여 시뮬레이션이 실행된다. 각 구간별 선속은 해빙의 두께와 집적도, 풍향, 파고에 따라 결정된다. 이를 통해 선박의 평균속도가 결정되며 유도쇄빙선의 이용 여부를 판단하여 사용시간을 결정하고, 이러한 계산이 완료되면 다음 노드로 이동하여 위의 과정을 반복 수행하게 된다.

Table 5-2에서 음영부분은 유도쇄빙선이 앞에서 유도하는 경우, 유도된 선박의 속도인데 일반적으로 유도쇄빙선은 해빙의 집적도가 80%를 초과할 때 선박의 운항을 위해서 필요하다. 특히 해빙의 집적도가 60~80% 정도일 때, 해빙의 두께가 120cm 이상이면 유도쇄빙선은 빙해역에서 선박의 항행을 위해 꼭 필요한 것으로 간주되어진다. 이러한 조건에 의해 선박의 속도가 결정되고 나면 추가적으로 선속에 대한 보정작업이 필요하다 (Table 5-3). 이는 선박이 항행과정 중에서 빙상조건에 의해 항로를 이탈하는 경우 원래 항로에 대한 보정을 위한 것이다. Table 5-3에서 음영부분은 유도쇄빙선에 의해 유도되는 경우 선속의 보정계수를 의미한다.

Table 5-2 Determination of ship's speed in knots based on sea ice thickness and concentration

		Ice thickness (cm)				
		Ice free	<120	120-180	180-240	>240
Ice concentration (%)	Ice free	Full speed	Full speed			
	<30		8	8	7	6
	30-60		8	8	7	6
	60-80		6	10	10	10
	80-100		8	6	6	4

* Full speed: 선박별 최대선속을 나타냄.

1) Norilsk: 17.0knots

2) Lunni: 14.5knots

3) Strekalovsky: 15.2knots

4) Vasily Dinkov: 15.0knots

Table 5-3 Initial ship speed to compensate for selected sea route

		Ice thickness (cm)				
		Ice free	<120	120-180	180-240	>240
Ice concentration (%)	Ice free	1.00	1.00			
	<30		0.97			
	30-60					
	60-80		0.95			
	80-100					

Table 5-4 Determination of ship's speed in knots based on wind direction, ice concentration and wave height

Ice concentration (%)	Wave height (m)	Wind direction vs. ship heading		
		Head sea	Beam sea	Following sea
Ice free (full sea)	<3m	Full speed -1kn	Full speed	Full speed
	3 to 5m	Full speed -2kn	Full speed	Full speed +1kn
	>5m	Full speed -6kn	Full speed -3kn	Full speed -3kn
0-30% (partial sea)	<1m		8kn	
	1 to 2m		7kn	
	2 to 3m		6kn	
	3 to 5m		5kn	
	5 to 7m		4kn	
>30% (no sea)	>7m		3kn	
	0m		Full speed	

Table 5-4에서는 바람의 방향과 파고, 해빙의 집적도 등이 선속에 어떻게 적용되는지 제시되어 있다. 표에서 나타난 바와 같이 빙해역에서 해빙의 집적도가 30% 이상인 경우에는 선박의 항행 시 유도쇄빙선을 이용하므로 선속은 Table 5-2에서 제시된 값과 같을 것이다. 하지만 해빙의 집적도가 30% 보다 작은 경우 선박은 빙해역을 독자적으로 운항하므로 풍향과 파고에 의해 선속은 Table 5-4에서 주어진 값처럼 느려질 것이다. 이와 더불어 큰 파고가 일 경우 선속은 개빙구역보다 훨씬 느려지는데, 이는 해빙과의 충돌로 인해 선박이 손상 받을 위험성이 증가하기 때문이다.

항로선택 과정을 살펴보면 Fig. 5-3에서 1번 데이터 노드에서 0번 결정 노드로 진행을 하면 0번 결정 노드에서는 0-2A구간의 데이터 노드와 0-2구간의 데이터 노드에서 각 노드에 대한 환경정보를 바탕으로 자료를 분석하여 선박이 보다 항행하기 좋은 환경의 데이터 노드를 선택하고 그 방향으로 진행을 하게 되며, 각 결정 노드에 도달할 때 마다 위와 같은 과정을 반복 실행하게 된다. 이는 빙해역에서 실제 선박의 항행과정과 유사한 방법으로서 본 모델에서는 이와 같은 방법을 바탕으로 항로구간을 선택하였다.

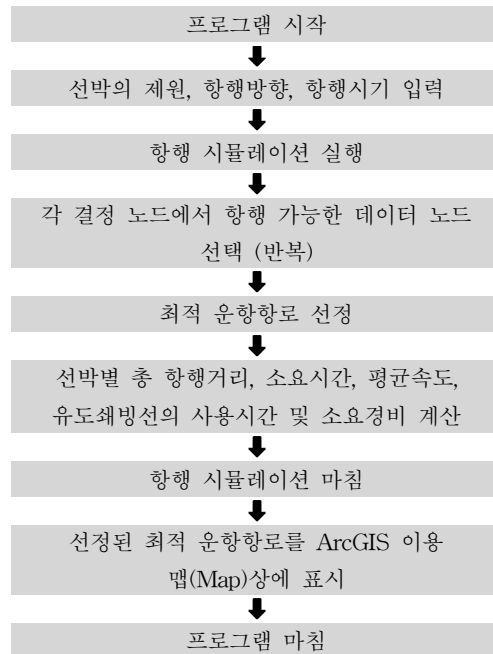


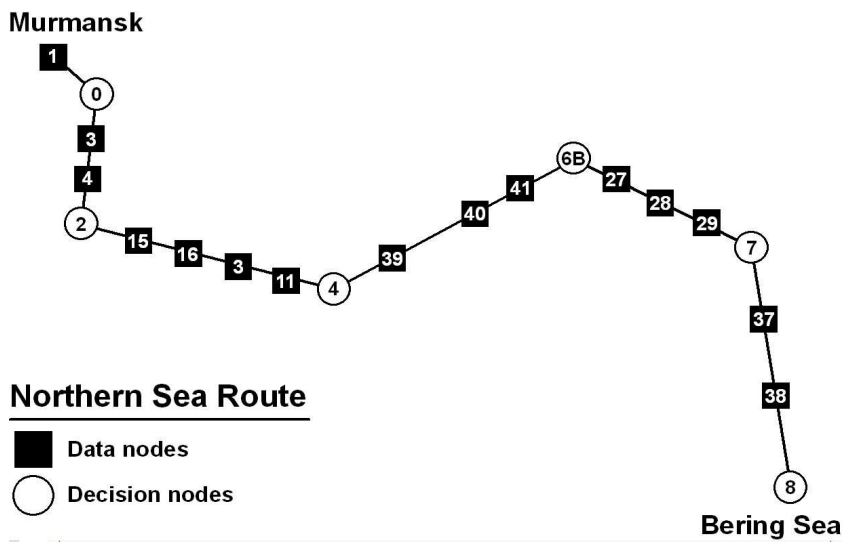
Fig. 5-8 Flowchart of ice transit model simulation procedures

이렇게 항로구간이 결정되고 나면 선정된 항로구간에 대한 선박별 총 항행거리와 소요시간, 평균속도 및 유도채빙선의 사용시간과 소요경비를 순차적으로 계산하여 출력한다. 빙해역 항행 모델의 전체적인 과정은 Fig. 5-8과 같다.

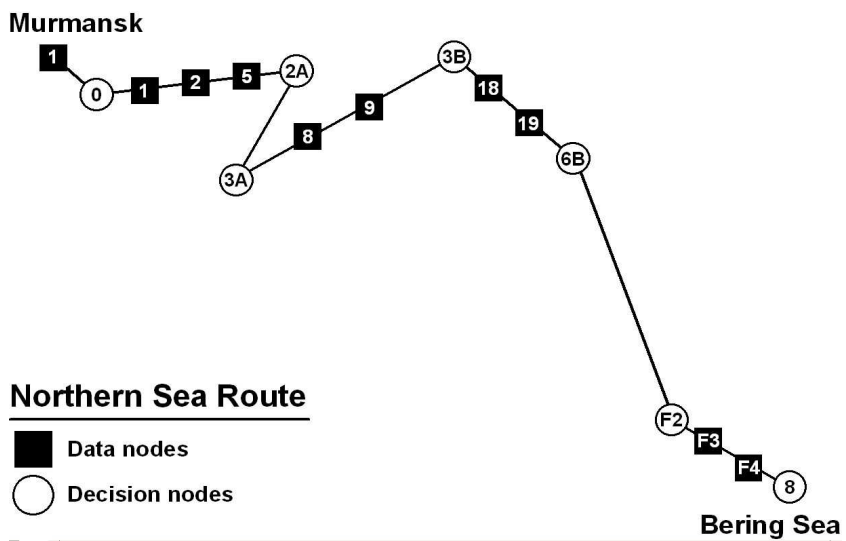
본 모델에서 북극해 항로의 항행시기 선정에서는 북극해 지역의 지리적 특성을 고려해볼 때 12월, 1월, 2월 등은 많은 해역이 해빙으로 덮여있어 선박의 항행에 많은 어려움이 존재하므로 해상의 환경상태가 보다 양호한 4월, 6월, 8월, 10월을 항행시기로 선정하고 이에 대해 시뮬레이션을 실행하였다.

항행 시뮬레이션 과정을 통해 얻어진 항행 시기별(4월, 6월, 8월, 10월) 최적 운항항로는 Fig. 5-9와 같다.

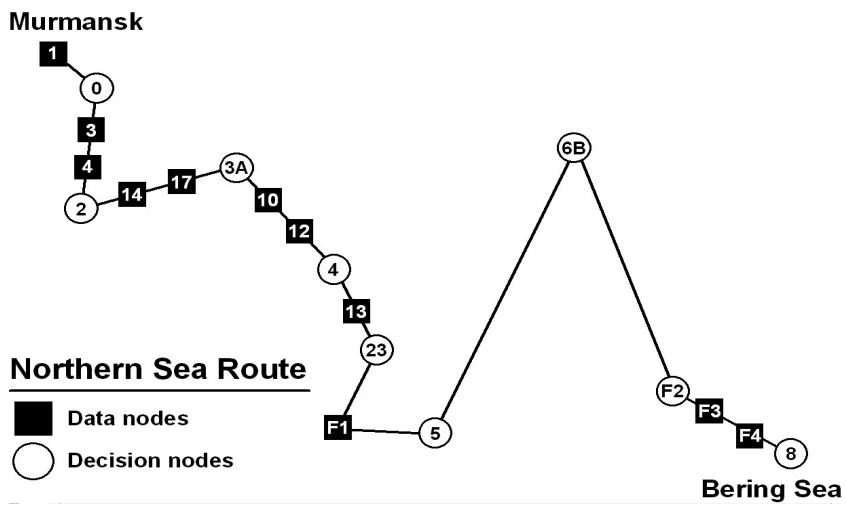
< 4월 최적 운항항로 >



< 6월 최적 운항항로 >



< 8월 최적 운항항로 >



< 10월 최적 운항항로 >

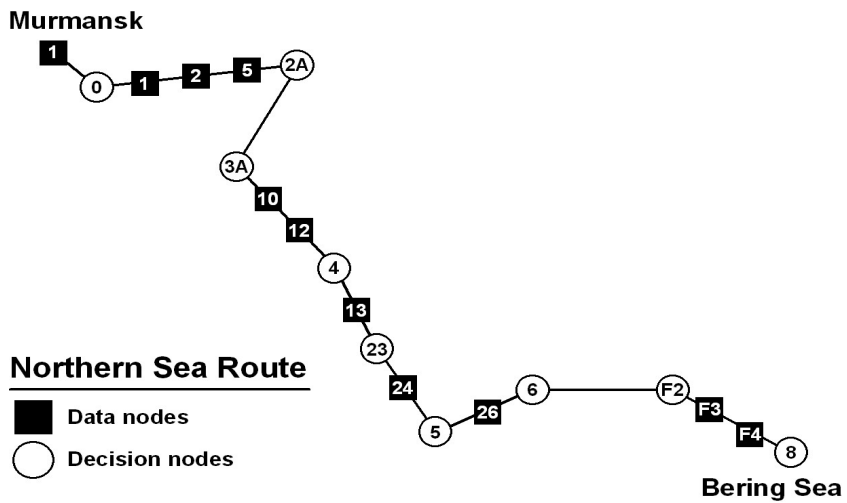


Fig. 5-9 Monthly optimum sea routes determined

위와 같이 최적 운항항로가 선정되고 나면 선정된 항로에 대해 선박별로 총 항행거리, 예상 소요시간, 평균속도, 유도채빙선의 사용시간 및 소요경비를 순차적으로 계산하여 출력하고 항행 시뮬레이션 과정을 마친다. 각 시기별 최적 운항항로에 대한 시뮬레이션 결과를 정리하면 Table 5-5와 같다.

Table 5-5 Results of transit model simulation

4월 최적 운항항로	<i>Norilsk</i>	<i>Lunni</i>	<i>Strekalovsky</i>	<i>Vasily Dinkov</i>
1) Total Transit Length (nm)	2957.70	2957.70	2957.70	2957.70
2) Total Elapsed Time (hr)	254.66	276.60	270.08	271.91
3) Mean Speed (knot)	11.61	10.69	10.95	10.88
4) Mean IB escort (hr)	126.25	126.25	126.25	126.25
5) Total Cost (\$)	357250	331320	314970	764740

6월 최적 운항항로	<i>Norilsk</i>	<i>Lunni</i>	<i>Strekalovsky</i>	<i>Vasily Dinkov</i>
1) Total Transit Length (nm)	3299.45	3299.45	3299.45	3299.45
2) Total Elapsed Time (hr)	337.26	366.86	358.06	360.53
3) Mean Speed (knot)	9.78	8.99	9.21	9.15
4) Mean IB escort (hr)	195.65	195.65	195.65	195.65
5) Total Cost (\$)	416620	382100	356210	857060

8월 최적 운항항로	<i>Norilsk</i>	<i>Lunni</i>	<i>Strekalovsky</i>	<i>Vasily Dinkov</i>
1) Total Transit Length (nm)	3371.52	3371.52	3371.52	3371.52
2) Total Elapsed Time (hr)	280.79	311.51	302.25	304.84
3) Mean Speed (knot)	12.01	10.82	11.15	11.06
4) Mean IB escort (hr)	64.13	64.13	64.13	64.13
5) Total Cost (\$)	376000	351000	330050	799040

10월 최적 운항항로	<i>Norilsk</i>	<i>Lunni</i>	<i>Strekalovsky</i>	<i>Vasily Dinkov</i>
1) Total Transit Length (nm)	3178.81	3178.81	3178.81	3178.81
2) Total Elapsed Time (hr)	256.86	284.04	275.86	278.15
3) Mean Speed (knot)	12.38	11.19	11.52	11.43
4) Mean IB escort (hr)	100.84	100.84	100.84	100.84
5) Total Cost (\$)	358830	335510	317680	771240

계산된 결과는 시뮬레이션 과정을 통해 선정된 최적 운항항로를 따라 선박별로 항행 시 예상되는 소요시간과 경비를 산정한 것이다. 만약 북극해 지역의 환경정보에 대한 데이터가 충분히 확보된다면 이러한 정보로부터 쇄빙상선의 항행시기와 항행방향, 선박의 제원과 같은 기본적인 정보를 파악하여 본 연구에서 개발한 빙해역 항행 모델의 시뮬레이션 실행을 통해 실제로 선박이 항행을 하지 않고도 상황을 미리 예측할 수 있다.

5.2.2 ArcGIS를 이용한 최적 운항항로 구현

언급한 바와 같이 항행 시기별 최적 운항항로가 결정된 후에 선정된 항로는 ArcGIS를 이용해 지도상에 최적 운항항로를 표시하여 북극해 지역에 관심 있는 사용자가 쉽게 항로 정보를 파악할 수 있도록 하였다.

ArcGIS는 클라이언트 소프트웨어, 서버 소프트웨어, 데이터 요소 등을 포함하는 일련의 GIS 소프트웨어 제품으로서, 본 연구에서는 ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox를 이용해 북극해 항로 항행 모델의 항행 시뮬레이션을 통해 선정된 쇄빙선박의 최적 운항항로를 북극해 지도상에 표시하고, 이들 지역의 환경정보를 정리하였다.

1) ArcMap

ArcMap은 데이터의 디스플레이 작업 및 속성데이터의 쿼리(Query)작업과 더불어 편집 및 분석 작업을 하는데, 주로 지도 작성에 사용된다.

2) ArcCatalog

ArcCatalog 애플리케이션은 프로그램 사용자의 모든 GIS 데이터를 구성하고 관리하

는 기능을 가지고 있다. 또한 ArcCatalog에서는 메타데이터의 생성 및 관리를 통해 사용자가 직접 작성한 데이터베이스를 확인할 수 있다.

3) ArcToolbox

ArcToolbox 창은 데이터 변환, 좌표체계 관리, 맵 투영법 변경과 같은 기능을 가지고 있다. 또한 사용자의 편의를 위해 ArcCatalog 또는 ArcMap으로부터 데이터의 drag-and-drop 작업을 지원한다 (ESRI 2004).

본 연구에서는 ArcGIS를 이용해 북극해 지역의 빙상자료와 파고, 풍향조건 등과 같은 정보를 입력하여 새로운 데이터 셋(Data set)을 형성하였다. 그리고 이러한 데이터를 바탕으로 하여 ArcCatalog에서 퍼스널 지오데이터베이스(Personal Geodatabase)를 만들고 피쳐(feature)를 생성하였다. 그 다음 생성된 피쳐에 속성값을 편집기를 사용하여 입력하고 유형을 분류한 뒤 피쳐의 디스플레이 작업을 위해 테이블을 편집하여 피쳐간 공간관계의 분석을 통해 지도상에 나타내고, 이를 통해 사용자가 데이터를 가시적으로 볼 수 있도록 하여 관심영역에 대한 속성값은 물론 거리와 좌표, 해당 지역의 정확한 위치 파악이 가능하도록 하였다. 또한 자료 조사를 통해 얻어진 환경정보를 테이블로 만들어 사용자가 어떠한 지역에서의 빙상상태나 환경조건에 대한 속성값이 필요할 경우 데이터 확인이 가능하며, 사용자가 View를 통해 Mapping이 가능하도록 구성되었다. ArcGIS의 전반적인 작업과정은 Fig. 5-10과 같다.

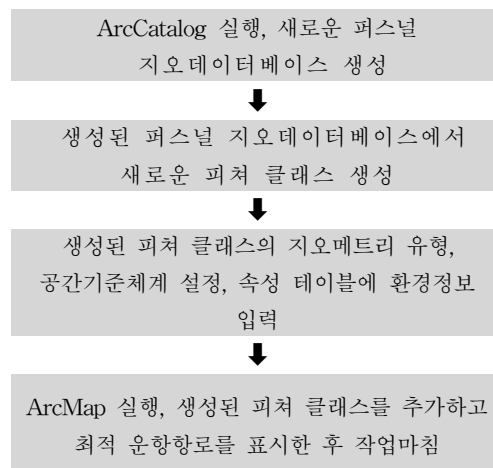


Fig. 5-10 Flowchart of ArcGIS process

ArcGIS는 지도 데이터의 작성 및 자료의 정리와 분석 작업이 용이하므로 이를 이용하여 앞서 북극해 항로 항행 모델의 시뮬레이션을 통해 선정된 4월, 6월, 8월, 10월 각각의 최적 운항항로를 ArcMap, ArcCatalog를 이용하여 지도상에 표시하였으며, 그 결과를 나타내면 Fig. 5-11과 같다.

< 4월 최적 운항항로 >

각 시기별 항행구간은 Fig. 5-9에서 제시된 항로와 동일함



< 6월 최적 운항항로 >



< 8월 최적 운항항로 >



< 10월 최적 운항항로 >



Fig. 5-11 Visualization of monthly optimum sea routes selected

이와 같이 ArcGIS를 이용해 북극해 지역에서 쇄빙상선의 시기별 항행 구간을 지도 상에 표시하여 시각적으로 나타냄으로써 사용자는 항로 정보를 보다 쉽게 파악할 수 있다. 기존의 항행 모델에서는 최적 운항항로의 선정에 중점을 두었다면, 본 모델에서

는 쇄빙상선의 최적 운항항로를 선정하고, 이를 지도상에 나타냄과 더불어 시뮬레이션 결과를 데이터 셋으로 형성함으로써 데이터의 확인 및 분석이 보다 용이해졌다.

VI. 결 론

본 논문에서는 빙해역 운항 시 쇄빙상선에 작용하는 빙하중 문제를 해결하기 위해 빙-선체 상호작용을 이해하고 기 발표된 빙하중 산정식의 고찰을 통해 쇄빙상선에 적용 가능한 새로운 빙하중 추정식을 제안하였다.

이를 종합적으로 판단할 때 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다

- 1) 빙하중은 선급에서 규정된 선박 추진기관의 출력과 관련된 빙저항 문제와 달리 선체 구조의 거동특성에 영향을 미치는 요소로서, 선박의 종강도(longitudinal strength)상의 문제나 진동 문제를 일으키는 전체 빙하중(global ice load)과 선박의 선수부나 선측 외판에 직접 작용하여 구조 부재의 탄·소성 변형을 유발시키는 국부 빙압력(local ice pressure)의 관점에서 접근해야 한다.
- 2) 빙하중 산정에 있어 쇄빙선과 쇄빙상선에 대한 별도의 추정식이 필요하다. 그 이유는 선수 형상과 함께 선박의 크기에 있어 쇄빙선과 쇄빙상선의 차이가 현저하며, 대형화된 쇄빙상선에 적용할 수 있는 데이터의 양은 대단히 제한적이어서 재래식 쇄빙선 선형의 결과를 쇄빙상선에 일반화하기에는 미흡하기 때문이다.
- 3) 기 발표된 전체 빙하중 추정 경험식의 대부분은 빙해역 운항 시 선박의 충돌속도와 배수량, 선수각, 엔진출력 등의 함수로 표현되는데, 추정식의 경우 전체 빙하중은 제안된 식들 간에 서로 상당한 편차가 존재한다. 이는 추정식이 일부 선박의 빙하중 실측자료를 바탕으로 도출된 결과이므로 대상 선박의 제원과 다른 선박에 적용하는 데에는 다소 무리가 있는 것으로 판단된다. 또한 추정식이 선박의 특정 변수만을 포함하고 있어 이러한 변수들 간에 지수값의 차이 때문으로 보여진다. 본 연구에서 제안한 추정식은 MV Arctic호와 같은 쇄빙상선을 대상으로 여타 추정식보다 배수량이 추정값에 영향을 미치는 정도를 고려했기 때문에 대형 선박에 적용할 경우 기존의 전체 빙하중 추정식보다 상당히 현실적임을 알 수 있다.
- 4) 국부 빙압력 추정 경험식의 경우 대부분은 얼음과의 접촉면적의 함수로서 표현된다. 이는 국부 빙압력의 경우 전체 빙하중과는 달리 선박의 선수 형상, 배수량, 엔진출력 등에 대한 영향보다 빙해역 항행 시 얼음과의 접촉면적이 보다 중요한 문제임을 시사

한다. 또한 지금까지 수집된 실측 데이터 분석을 통해 선박에 작용하는 국부 빙압력은 실측값과 추정값의 정도와 경향이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 전체 빙하중 추정식의 경우와 마찬가지로 MV Arctic호의 빙압력 실측자료를 바탕으로 쇄빙상선에 적용 가능한 새로운 국부 빙압력 추정식을 제안하였으며, 이는 본 연구에서 수집한 빙압력 데이터를 잘 대변해 주고 있다.

5) 쇄빙선박에 대한 추가적인 빙하중 실측자료 확보와 빙-선체 상호작용 수치 시뮬레이션 모델링이 함께 병행되어야 한다. 장기적인 실측자료 확보는 향후 확률론적 접근법이나 Risk Analysis를 위해 반드시 수행되어야 하며, 수치 모델링과 실측자료의 분석을 통해 보다 정확한 빙하중을 산정할 수 있다. 이를 위해 수치 해석적 기법에 관한 연구와 함께 현재 국내에서 건조 중인 쇄빙연구선이나 쇄빙상선의 건조 단계에서 빙하중 자료 수집을 위한 시운전 계획이 사전에 수립되어야 할 것이다.

6) 빙하중 산정 소프트웨어 "IceView 1.2"는 실제 조선 현장에서 쇄빙선박 설계 시 선박에 작용하는 빙하중 문제를 보다 쉽고 간편하게 접근하기 위한 목적으로 개발되었다. 우선 기존의 빙하중 실측자료를 확보하여 정리하고 기 발표된 빙하중 추정 경험식과 함께 새롭게 제안한 빙하중 추정식을 통해 이미 건조되었거나 건조 예정인 선박에 대해 빙하중을 추정하였다.

또한 본 연구에서는 북극해 항로(Northern Sea Route, NSR)를 구성하는 다수의 항로에서 경제적인 요건을 만족하는 최적 운항항로(optimum sea route)를 선정하기 위해 빙해역 항행 모델(ice transit model)을 개발하였다.

빙해역 항행 모델에 대해서는 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1) 빙해역 항행 모델을 통해 무르만스크(Murmansk)에서 베링해협(Bering Strait)까지 연결하는 북극해 항로에 대해 항행 시기별(4월, 6월, 8월, 10월) 시뮬레이션 과정을 통해 최적 운항항로를 선정하여 총 항행거리 및 예상 소요시간, 평균속도, 유도쇄빙선의 사용시간 및 소요경비를 계산하여 현상을 미리 검증하였다.

2) 빙해역 항행 모델과 함께 ArcGIS를 이용해 북극해 지역에 대한 빙상자료 및 파고, 풍향 등과 같은 환경정보를 체계적으로 정리한 후 사용자의 이해를 도모하기 위해 가시화 작업을 통하여 그 결과를 지도상에 보여줌으로써 사용자가 보다 쉽게 항로를 파악하고 선정된 항로의 정보를 확인하는 데 도움을 주었다.

3) 최근 국제 원유가의 상승 추세로 인해 북극해 지역에 대한 관심이 증가하고 있다. 북극해 지역에 대한 빙상자료와 함께 북극해 연안의 해류와 풍향, 파고, 수심 등에 관한 환경정보의 지속적인 데이터베이스를 구축을 통하면 항행 시기별 최적 운항항로에 대해 보다 정확한 경제성 평가를 할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Baker, D. and Nishizaki, R., 1986, "The MV Arctic - New Bow Form and Model Testing," Society of Naval Architects and Marine Engineers Transactions, Vol.94, pp.57-74.
- [2] Daley, C.G., St. John, J.W., Seibold, F. and Bayly, I., 1984, "Analysis of Extreme Ice Loads Measured on USCGC Polar Sea," Society of Naval Architects and Marine Engineers Transactions, Vol.92, pp.241-252.
- [3] Daley, C.G., 1984, "Baffin - A Dynamic Ship/Ice Interaction Model," Ice Tech '84 - Third International Conference on Icebreaking and Related Technologies, SNAME Arctic Section, Calgary, pp.F1-F8, May 1984.
- [4] Daley, C.G., Phillips, L.D. and McCallum, J.S., 1986, "Dynamic Ship/Ice Impact - Results of Parametric Model Testing," Proceedings of the First International Conference on Ice Technology (ed. T.K.S. Murthy), pp.349-363.
- [5] Daley, C.G., St. John, J.W., Brown, R., Meyer, J. and Glen, I., 1990, Ice Loads and Ship Response to Ice - A Second Season, Report No. SSC-339, Ship Structural Committee. (Arctec Canada + U.S. Maritime Administration Project)
- [6] Daley, C.G., St. John, J.W., Brown, R. and Glen, I., 1990, Ice Forces and Ship Response to Ice - Consolidation Report, Report No. SSC-340, Ship Structural Committee. (Arctec Canada + U.S. Maritime Administration Project)
- [7] Daley, C.G., 1994, MSI Ice Loads Data - Compilation of Medium Scale Ice Indentation Test Results and Comparison to ASPPR, Report submitted to National Research Council Canada.
- [8] Dick, R.A., Bell, M.H. and Prior, A., 2006, "A Proposed Icebreaker for Shipping LNG from Canadian Arctic", Proceedings of IceTech '06 Symposium, Banff, Canada, Paper No.130-RF.

- [9] ESRI, 2004, Introduction to ArcGIS Desktop.
- [10] Frederking, R., 1999, "The Local Pressure-Area Relation in Ship Impact with Ice", Proceedings of the 15th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Helsinki, Finland, pp.687-696.
- [11] Frederking, R., 2000, Local Ice Pressures from the Louis S. St. Laurent 1994 North Pole Transit, TP13671 E, Technical Report HYD-TR-054, National Research Council of Canada.
- [12] Frederking, R.M.W., 2003, "Determination of Local Ice Pressures from Ship Transits in Ice", Proceedings of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, pp.484-488.
- [13] Frederking, R., 2005, "Local Ice Pressures on the Oden 1991 Polar Voyage", Proceedings of the 18th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Potsdam, NY, USA, pp.353-363.
- [14] Frederking, R. and Johnston, M., 2005, "Local Ice Pressures on the CCGS Terry Fox", Proceedings of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul, Korea, pp.718-723.
- [15] Ghoneim, G.A.M. and Keinonen, A., 1983, "Full Scale Impact Tests of Canmar Kigoriak in Thick Ice", Proceedings of the 7th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Helsinki, Finland, Vol.3, pp.329-346.
- [16] Ghoneim, G.A.M., Johansson, B.M., Smyth, M.W. and Grinstead, J., 1984, "Global Ship Ice Impact Forces Determined from Full-scale Tests and Analytical Modeling of the Icebreakers Canmar Kigoriak and Robert LeMeur," Society of Naval Architects and Marine Engineers Transactions, Vol.92, pp.253-282.
- [17] Glen, I.F., Daley, C.G. and Tam, G., 1985, "Analysis of the Structure of the Proposed CCG Polar Class 8 Icebreaker under Extreme Ice Loads," Society of Naval Architects and Marine Engineers Transactions, Vol.93, pp.283-301.

- [18] Iyer, S.H., 1988, A State of the Art Review of Local Ice Loads for the Design of Offshore Structures, Proceedings of the IAHR Ice Symposium, Sapporo, pp.509-566.
- [19] Johnston, M., Frederking, R., Timco, G. and Miles, M., 2001, Whole-Ship Motions of USCGC Healy as Applied to Global Ice Impact Forces, Proceedings of the 16th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Ottawa, Canada, pp.955-964.
- [20] Johnston, M., Frederking, R. and Timco, G., 2001, Whole-Ship Motions and Accelerations at the Stern of the CCGS Louis S. St-Laurent October 2000 Ice Trials, TP13806 E, Technical Report HYD-TR-062, National Research Council of Canada.
- [21] Johnston, M., Frederking, R., Timco, G. and Miles, M., 2003, Ice-Induced Global Loads on USCGC Healy and CCGS Louis S. St-Laurent as Determined from Whole-Ship Motions, TP14291 E, Technical Report CHC-TR-014, National Research Council of Canada.
- [22] Johnston, M. and Gagnon, R., 2005, "Validating MOTAN: Results from Model-Scale Impact Tests with the CGGS Terry Fox", Proceedings of the 18th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Potsdam, NY, USA, pp.409-419.
- [23] Keinonen, A., 1983, "Ice Loads on Ships in the Canadian Arctic", Ch.X, Western European Graduate Education for Marine Technology, March 1983, Finland.
- [24] Liljestrom, G. et al., 1990, "Result from the Hull Scale Testing of the New Icebreaker ODEN," Ice Tech '90 - Fourth International Conference on Ships and Marine Systems in Cold Regions, SNAME Arctic Section, Calgary, pp.F1-F9, March 1990.
- [25] Lindberg, K., Hammarstrom, L. and Johansson, B.M., 1989, "Hull Structure

of the Icebreaker Oden", Proceedings of International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Vol.3, Lulea, Sweden, pp.1468-1485.

[26] Masterson, D.M. and Frederking, R.M.W., 1993, "Local Contact Pressures in Ship/Ice and Structure/Ice Interactions," Cold Regions Science and Technology, Vol.21, pp.169-185.

[27] Minnick, P., St. John, J., Cowper, B. and Edgecombe, M., 1990, Global Ice Forces and Ship Response to Ice, Report No. SSC-341, Ship Structural Committee. (Arctec Canada + U.S. Maritime Administration Project)

[28] Minnick, P. and St. John, J., 1990, Global Ice Forces and Ship Response to Ice - A Second season, Report No. SSC-343, Ship Structural Committee. (Arctec Canada + U.S. Maritime Administration Project)

[29] Mookhook, A.D., Voelker, R.P. and DeBord, F.W., 1981, "Summary of Selected Technical Results from Manhattan Arctic Marine", Proceedings of the IceTech '81, SNAME Spring Meeting/STAR Symposium, Ottawa, Canada, pp.21-33.

[30] Mulherin, N.D. et al., 1996, Development and Results of a Northern Sea Route Transit Model, Cold Regions Research and Engineering Laboratory Report 96-5, Hanover, New Hampshire, USA.

[31] Murer, C., 1983, "Strengthening of Hull Structures in Ice", Ch.XII, Western European Graduate Education for Marine Technology, March 1983, Finland.

[32] Rich, R., St. John, J., Browne, R. and Sheinberg, R. 1999, "Ice Load Impact Measurements on the CCGS Louis S. St. Laurent during the 1994 Arctic Ocean Crossing", Proceedings of the 18th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, St. John's, Canada, Vol.V, pp.39-46.

[33] Sanderson, T.J.O., 1988, Ice Mechanics - Risks to Offshore Structures, Graham & Trotman, London.

- [34] St. John, J.W., Daley, C. and Blount, H. 1990, Ice Loads and Ship Response to Ice-Summer 1982/Winter 1983 Test Program, Report No. SSC-329, Ship Structural Committee. (Arctec Canada + U.S. Maritime Administration Project)
- [35] St. John, J.W. and Minnick, P.V., 1995, Ice Load Impact Study on the National Science Foundation's Research Vessel Nathaniel B. Palmer, Report No. SSC-376, Ship Structural Committee. (Science and Technology Corp. + U.S. Coast Guard Project)
- [36] Tsoy, L.G. et al., 1998, Collection of SA-15 Operations Data. INSROP Working Paper 107.
- [37] White, R.M., 1970, "Prediction of Icebreaker Capability," The Royal Institution of Naval Architects, Vol.112, pp.225-251.
- [38] 野澤和男, 2006, 氷海工學, 成山堂書店, 東京.
- [39] 정성엽, 최경식, 2006, "쇄빙상선과 북극해 항로의 Ice Transit Model", 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, pp.858-865.
- [40] 정성엽, 최경식, 2006, "ArcGIS를 이용한 쇄빙상선의 북극해 항로 항행 모델링", 대한조선학회 추계학술발표회 논문집, pp.803-810.
- [41] 정성엽, 최경식, 2007, "쇄빙상선의 북극해 항로 항행 모델링", 대한조선학회 논문집, 44권, 3호, pp.340-347.
- [42] 최경식, 정성엽, 2007, "쇄빙상선 선수부에 작용하는 빙하중의 간이 추정식", 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, pp.647.
- [43] 한국산업기술평가원, 2006, "2006년도 산업기술동향분석- 2. 빙해(Ice Class) 선박".